

**VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE TORNILLOS HIDRODINÁMICOS
PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA**

CASO QUEBRADA EL CHUSCAL

**MARIO ESTEBAN MADRID WOLFF
JUAN MANUEL TORO BEDOYA**

Trabajo de grado para optar al título de:

INGENIERO CIVIL

Director:

SANTIAGO ORTEGA ARANGO

**PROFESOR DEL ÁREA MECÁNICA DE FLUIDOS Y RECURSOS
HIDRÁULICOS**

ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA
INGENIERÍA CIVIL
ENVIGADO
2013**

CONTENIDO

GLOSARIO.....	8
RESUMEN	8
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11
PRELIMINARES.....	12
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1.1 Contexto Y Caracterización Del Problema.....	12
1.1.2 Formulación Del Problema	13
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	17
1.2.1 Objetivo General	18
1.2.2 Objetivos Específicos.....	18
1.3 MARCO DE REFERENCIA.....	18
1.3.1 MARCO CONTEXTUAL.....	18
1.3.2 MARCO TEÓRICO	20
MORFOLOGÍA DE LA CUENCA	21
DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE HIDROSIG.....	22
Curva De Duración De Caudales y ciclo anual	24
CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL DE LA QUEBRADA EL CHUSCAL	26
2. METODOLOGÍA.....	28
ETAPA I. ESTUDIO DE PROYECTOS REPRESENTATIVOS EJECUTADOS .	29
ETAPA II. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DE DISEÑO	29
ETAPA III. ANÁLISIS DE POSIBLES AFECTACIONES AMBIENTALES.....	29
ETAPA IV. DISEÑO TÉCNICO	29
ETAPA V. ANÁLISIS ECONÓMICO	29

3. DESARROLLO DEL PROYECTO	30
3.1 IDENTIFICACIÓN DE PROYECTOS REPRESENTATIVOS EJECUTADOS	30
3.1.1 Tees Barrage White Water Course Upgrade (Reforma Al Dique Del Río Tess).....	30
Descripción General	30
Localización	31
Hidrología	33
3.1.2 Proyecto Morden Hall Park	33
Descripción General	33
Localización	35
Hidrología	35
3.2 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DE DISEÑO	36
3.2.1. Densidad Del Agua	36
3.2.2. Aceleración De La Gravedad	38
3.2.3. Altura (cabeza de generación)	38
3.2.4. Caudal	39
3.2.5. Eficiencia	39
3.3 ANÁLISIS DE POSIBLES AFECTACIONES AMBIENTALES	40
3.3.1 Amabilidad Del Tornillo Con Los Peces.....	40
3.3.2 Paso Libre De Sedimentos Por El Elemento De Generación.	42
3.3.3 Aspectos Socioeconómicos	43
3.4 DISEÑO TÉCNICO	44
3.4.1 Determinación Del Caudal Medio	44
Caudal Medio Determinado Por Referencias Bibliográficas	47
Caudal Ecológico	47

Caudal De Diseño.....	48
3.4.2 Localización	49
Localización Geográfica.....	49
Localización Tornillo En Campo	50
3.4.3 Diseño Geométrico Del Tornillo	51
3.4.4 Diseño Geométrico Del Tornillo (Proyecto Quebrada El Chuscal).....	57
3.4.5 Diseño De La Estructura De Captación (Vertedero)	59
3.4.6 Diseño De La Estructura De Captación (Rejilla De Recolección)	61
3.4.7 Diseño Hidráulico Del Canal De Recolección	64
3.4.8 Diseño Estructural Del Canal De Recolección	66
3.5 LINEAS DE TRANSMISIÓN.....	68
3.6 ANÁLISIS ECONÓMICO	69
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	85
5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	87
BIBLIOGRAFÍA	90
<i>ANEXO 1. PLANO CONSTRUCTIVO DE TORNILLO HIDRODINÁMICO PROYECTO QUEBRADA EL CHUSCAL.....</i>	<i>93</i>
<i>ANEXO 2. PLANO DE TRAZADO EN PLANTA Y EN PERFIL DEL PROYECTO.....</i>	<i>94</i>
<i>ANEXO 3. COTIZACIÓN TORNILLO HIDRODINÁMICO</i>	<i>95</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.Relación de la capacidad instalada y el costo índice de instalación de plantas hidroeléctricas. (ENERGIA, 2005).....	13
Figura 2. Rangos de implementación de turbinas, editada por Juan Manuel Toro B. (S.J. Williamson, 2011)	14
Figura 3. Eficiencia de generación de diferentes tipos de generadores (Andritz), editado por Juan Manuel Toro Bedoya	15

Figura 4. Tornillo hidrodinámico (Andritz), editado por Juan Manuel Toro B.	16
Figura 5. Truchera en el municipio de Jardín, Antioquia (Municipio de Jardín)	17
Figura 6. Cuenca quebrada El Chuscal. (Ángel Sanint, Mesa Sánchez, & Rubiano Ortegón, 1988)	21
Figura 7. Detalle Cuenca quebrada EL Chuscal. (Ángel Sanint, Mesa Sánchez, & Rubiano Ortegón, 1988).....	22
Figura 8. Convenciones planos de cuenca quebrada El Chuscal. (Ángel Sanint, Mesa Sánchez, & Rubiano Ortegón, 1988)	22
Figura 9. Cuenca quebrada el Chuscal.....	23
Figura 10. Curva de duración de caudales.....	25
Figura 11. Ciclo multianual de caudales (serie sintética quebrada El Chuscal)	26
Figura 12. Vista en planta de tramo final de la quebrada El Chuscal (Google Earth)	27
Figura 13. Perfil de tramo final de la quebrada El Chuscal (Google Earth).....	28
Figura 14. Quebrada El Chuscal a la altura del proyecto	28
Figura 15. Tess barrage white water course (dique de río Tess).....	31
Figura 16. Ubicación proyecto de interés	32
Figura 17. Imagen satelital canal río Tess.....	33
Figura 18. Ubicación canales de derivación, Google Maps	34
Figura 19. Tornillo Hidrodinámico de Morden Hall Park, (Natioal Trust)	34
Figura 20. Morden Hall Park. Tomado de Google Earth.....	35
Figura 21. Gráfica variación de densidad con la temperatura	37
Figura 22. Captura de individuos, (Bielefeld, 2001).....	42
Figura 23. Ciclo de los sedimentos, (encrypted)	43
Figura 24. Mediciones con correntómetro, quebrada El Chuscal.	44
Figura 25. Esquema para el cálculo de subáreas	45
Figura 26. Perfil de la quebrada en el punto de medición	46
Figura 27. Ubicación proyecto quebrada El Chuscal. Google Maps.....	49
Figura 28. Ubicación de coordenadas del proyecto. Google Maps.....	50

Figura 29. Volumen óptimo por giro versus número de hélices (Rorres, 2000)	54
Figura 30. Esquema geométrico en 3 dimensiones (tornillo proyecto quebrada El Chuscal). Unidades en mm.....	58
Figura 31. Frente y perfil del tomadique.....	61
Figura 32. Esquema representativo vertedero.	62
Figura 33. Plano de la rejilla de recolección.....	64
Figura 35. Plano constructivo del canal de suministro.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de centrales hidroeléctricas según capacidad instalada	13
Tabla 2. Capacidad efectiva neta del SIN (Expertos en Mercados).....	19
Tabla 3. Sistema hidrológico del S. I. N. (Expertos en Mercados).....	19
Tabla 5. Variación de densidad del agua con la temperatura.....	37
Tabla 6. Peces capaces de pasar sin sufrir daño alguno, (Bielefeld, 2001).....	41
Tabla 7. Mediciones de profundidad y velocidad de flujo	45
Tabla 8. Cálculo de subáreas y caudal total.....	46
Tabla 9. Estimación de caudales máximos y mínimos (Ángel Sanint, Mesa Sánchez, & Rubiano Ortégón, 1988)	47
Tabla 10. Altimetría lugar de estudio.....	51
Tabla 11. Relaciones óptimas del tornillo de Arquímedes para varios diferentes números de hélices. (Rorres, 2000). Editada por Mario Esteban Madrid Wolff.	56
Tabla 12. Diseño geométrico de tornillo (proyecto quebrada El Chuscal)	57
Tabla 13. Parámetros para el cálculo de potencia del proyecto quebrada El Chuscal.....	59
Tabla 14. Diseño de vertedero.....	61
Tabla 15, Producto factores C1 y C2	63
Tabla 16, Tipo de rejilla (Nyerges)	63
Tabla 17. Diseño del canal de suministro.....	65
Tabla 18. Velocidad de sedimentación a 10 ° C (Escuela de Ingeniería de Antioquia).....	66

Tabla 19. Diseño estructural del canal de suministro.	67
Tabla 20. Retornos anuales de inversión. (Damodaran)	71
Tabla 21, Valor medio compañías E.E.U.U. (Damodaran)	71
Tabla 22. Promedio ponderado del costo de capital (WACC)	73
Tabla 23. Resumen análisis de precios unitarios	78
Tabla 24. Financiamiento de inversión inicial.....	79
Tabla 25. Amortización de crédito bancario	79
Tabla 26. Variación del precio de electricidad en bolsa.....	80
Tabla 27. Proyección de ventas diarias y aumento del precio generación de electricidad	81
Tabla 28. Utilidades disponibles para socios	83
Tabla 29. Comparación WACC.....	84
Tabla 30. Proyectos realizados por Mann Power Consulting Limited	85

GLOSARIO

Tornillo hidrodinámico: corresponde a un tornillo de Arquímedes que al estar semisumergido en un curso de agua, el flujo hace que este gire y mediante el acople a una caja de velocidades y generador se produce energía eléctrica.

Hélice: en el diseño de tornillos hace referencia al elemento de avance que describe una espiral. También puede emplearse el sinónimo entrada.

Paso de hélice: corresponde al avance de una rosca de un tornillo cuando esta realiza una revolución. De esta manera corresponde a una medida de longitud.

Rejilla de recolección: corresponde a la abertura sobre la estructura del tomadique que permite el ingreso del agua captada. Se dota con el diseño de una malla que permite el ingreso de cierta cantidad de agua y evita la entrada de objetos indeseados.

Tomadique: estructura empleada para la captación de aguas superficiales. Corresponde a una pequeña presa sobre la cual se dispone una abertura para la recolección del agua.

Velocidad de no sedimentación: velocidad del agua en un canal a partir de la cual se garantiza que los sólidos suspendidos no se precipitan hacia el fondo.

Central a filo de agua: también conocidas como centrales de pasada, hace alusión a las centrales que aprovechan la energía hidráulica sin necesidad de un embalse de acumulación de agua para generar energía eléctrica.

RESUMEN

Respondiendo a la necesidad del país por explotar los recursos hídricos a pequeña escala, disminuyendo así los efectos negativos que tienen las grandes hidroeléctricas y enfocados en proyectos de reducidas inversiones se decide abordar el diseño de un proyecto de generación mediante la tecnología de tornillos hidrodinámicos.

El estudio de viabilidad técnica y económica de tornillos hidrodinámicos para generación eléctrica, se realizará para el caso de estudio: quebrada El Chuscal, a la altura de Don Diego, en el oriente antioqueño, en la vía que comunica Medellín con el municipio de La Ceja. El sitio seleccionado se encuentra en el municipio de El Retiro.

El proyecto consiste en realizar un estudio acerca de la viabilidad técnica y económica de un proyecto de este tipo en Colombia. Se tomó entonces un lugar de estudio de características representativas de la topografía de montaña colombiana.

Para la viabilidad técnica se tendrán en cuenta aspectos como el diseño geométrico del tornillo, topografía de la zona, hidrología de la zona, caudales medios, mínimos y máximos de la quebrada, caudal requerido por el tornillo y cabeza de agua requerida.

El estudio de viabilidad económica del proyecto tendrá en cuenta factores como valor de construcción del tornillo, valor comercial del generador, valor de las obras civiles, valor del mantenimiento, ingresos por año y tiempo de retorno de la inversión.

Se tendrán en cuenta las posibles afectaciones ambientales. Con un enfoque en la afectación que el proyecto puede generar al factor del medio ambiente “naturaleza”, específicamente a la migración de peces e interrupción del flujo de sedimentos.

Después del desarrollo de este trabajo, se concluye que los proyectos de generación a filo de agua de pequeña escala son viables técnicamente en Colombia mediante la tecnología de tornillos hidrodinámicos. Si se tiene un fácil acceso al lugar del proyecto y el sitio es próximo a una subestación de energía este puede ser viable en términos económicos. El proyecto es amigable con el medio ambiente, pues este permite el paso de peces por el tornillo, no ocasiona interrupción en el flujo de sedimento y no requiere de inundaciones de terrenos.

Palabras clave: *tornillo, hidrodinámico, generación, Arquímedes*

ABSTRACT

Looking to give solution to the need of Colombia to take advantage of hydraulic resources without the negative impacts of large scale hydraulic generation, and focus on small investments, it is decided to design a project with hydrodynamic screw technology.

The research made on the technical and economic feasibility of hydrodynamic screws for power generation is applied for the project: El Chuscal creek, located on eastern Antioquia, on the road connecting Medellín and La Ceja

The site selected for the designs and analysis is representative of the Colombian mountain topography.

For the technical viability the following aspects are discussed: geometrical design, site topography, hydrology, the amount of minimum, mean and maximum water of the river and the height difference necessary.

The economic viability considers the value of construction of the screw, the value of the generator, the civil constructions, maintenance, environmental permit of operation, the annual income and the period for the investment return.

Environmental impacts would be considered, such as fish migration through the screw and sediment transportation effects.

It is concluded that this type of projects are technically possible for our country. The proximity of the projects to electrical grid facilities would determine the economical viability of this technology, but its environmental benefits of fish transit and sediment flow is well funded.

Key words: *screw, hydrodynamic, generation, Archimedes*

INTRODUCCIÓN

La generación eléctrica a partir de fuentes hídricas ha sido el pilar de la producción de Colombia. Para 2010 el 64,1 % de la capacidad instalada del SIN corresponde a generación hidroeléctrica, indicador de la dependencia y solidez de este tipo de fuente en el país.

El aprovechamiento del recurso hídrico para la generación ha sido a partir de proyectos de gran envergadura, con proyectos de capacidad instalada del orden de cientos de megavatios.

Surge entonces la inquietud sobre la posibilidad de aprovechamientos menores para generación de magnitudes reducidas. Si bien el país ha tenido desarrollo en los últimos años con la ejecución de numerosas P. C. H. (pequeñas centrales hidroeléctricas, clasificación en base a la potencia de generación con tope superior de 20 MW) existe aún un rango desatendido.

El aprovechamiento de potencias del orden de 1 kW hasta 500 kW ha sido mínimo en el país. Tal situación podrá explicarse tal vez debido a que la aplicación de la mayoría de los equipos electromecánicos no se ha enfocado en este rango. No obstante el desarrollo de energías renovables ha dinamizado el sector con diseños de múltiples tipos de equipos de generación diferentes a las tradicionales turbinas Pelton y Kaplan.

Entre estas tecnologías aparece recientemente el tornillo de Arquímedes para generación hidroeléctrica, con más de 180 proyectos ejecutados mundialmente en los últimos años.

En Colombia no se han ejecutado proyectos de este tipo y surge la potencialidad de su aplicación debido a las ventajas adicionales de la tecnología de tornillos hidrodinámicos, como las bajas inversiones, su alta eficiencia y el reducido impacto ambiental.

Este trabajo pretende entonces abordar el tema de generación hidroeléctrica a partir de tornillos hidrodinámicos analizando su viabilidad técnica y económica, tomando un caso de diseño específico, un proyecto sobre la quebrada El Chuscal en Antioquia.

PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1 Contexto Y Caracterización Del Problema

Uno de los métodos más utilizados para la generación eléctrica es a través de la inducción electromagnética. Este principio se utiliza en diversos equipos, como turbinas hidráulicas, turbinas de vapor de agua, turbinas eólicas, turbinas de corrientes marinas, entre otras. El principio radica en la transformación de la energía cinética de alguna fuente en energía eléctrica mediante un mecanismo denominado generador.

En el caso de la generación hidroeléctrica, la energía depende de la cantidad de energía cinética con que se cuenta para condiciones de sitio específicas. La capacidad de generación la determinará la cantidad de agua que fluye y la altura de la caída, incidiendo en la componente de masa y velocidad respectivamente en la ecuación de energía cinética (Ecuación 1). Estos conceptos son conocidos técnicamente como caudal y cabeza de altura.

$$\text{Energía cinética} = \frac{1}{2} \text{masa} * \text{velocidad}^2 \quad \text{Ecuación (1)}$$

Se puede tener capacidad de generación sin la necesidad de una cabeza de altura, donde se aprovechará entonces exclusivamente la energía asociada al caudal. Este es el caso de turbinas de generación a partir de corrientes submarinas, o de ruedas dispuestas sobre la corriente misma.

Sin embargo la cantidad de energía cinética puede aumentar considerablemente cuando se cuenta con ambos factores, el caudal y una cabeza de altura, donde este último permite la aceleración del flujo aumentando su velocidad final en el punto de generación.

Las turbinas hidráulicas han aprovechado la combinación de estos dos factores en diferentes magnitudes en infinidad de proyectos hidroeléctricos. Es decir, bajos o cuantiosos caudales combinados con considerables o reducidas cabezas de altura. No obstante existe un rango crítico de estas variables a nivel de factibilidad de generación y se trata de bajos caudales, bajas cabezas de generación o la combinación de ambas. Si bien esto implica capacidades instaladas bajas y están definidas por las condiciones propias del sitio del proyecto, el reto se encuentra principalmente en el equipo de generación, pues las turbinas tradicionales no son adecuadas para estas condiciones de microgeneración.

1.1.2 Formulación Del Problema

En situaciones de sitio donde se cuenta con caídas reducidas y caudales menores, el aprovechamiento hidráulico constituye un reto ingenieril pues no se cuenta con las economías de escala que permiten las grandes hidroeléctricas, tal como se observa en la Figura 1, donde hay clara evidencia de costos de instalación de alta variabilidad para bajas capacidades instaladas.

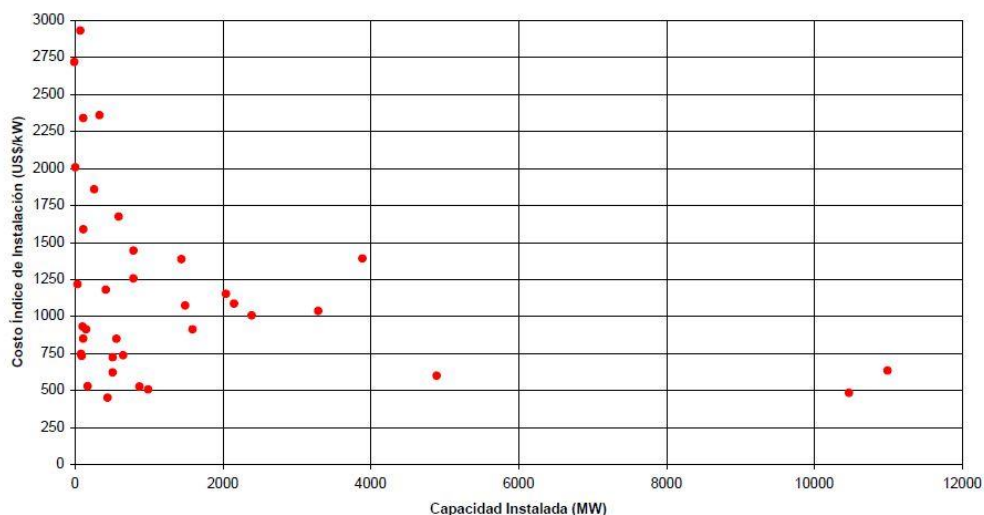


Figura 1. Relación de la capacidad instalada y el costo índice de instalación de plantas hidroeléctricas. (ENERGIA, 2005)

La Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) en función de la capacidad instalada de proyectos hidroeléctricos propone 5 categorías así:

Tabla 1. Clasificación de centrales hidroeléctricas según capacidad instalada

CLASIFICACIÓN	CAPACIDAD INSTALADA [kW]
Picocentrales	0,5 – 5,0
Microcentrales	5,0 – 50,0
Minicentrales	50,0 – 500,0
Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH)	500,0 – 20.000,0
Centrales Hidroeléctricas	>20.000,0

La Unidad de Planeación Minero-Energética del Ministerio de Minas y Energía colombiano indica que:

“Hay tres tipos principales de turbinas hidráulicas: la rueda Pelton, la turbina Francis y la de hélice o turbina Kaplan. El tipo más conveniente dependerá en cada caso del salto de agua y de la potencia de la turbina, en términos generales, la rueda Pelton conviene para saltos grandes, la turbina Francis para saltos medianos y la turbina de hélice o turbina Kaplan para saltos pequeños. En Colombia, dadas las condiciones topográficas predominan las dos primeras” (Energía, 2005).

Esto indica claramente que el potencial hídrico en Colombia ha sido aprovechado en proyectos de gran escala principalmente y si bien proyectos de pequeñas centrales, minicentrales y picocentrales se ha destacado en los últimos años, estos se han desarrollado con tecnologías tradicionales de turbinas Pelton, Francis y Kaplan, es decir no se mencionan otro tipo de tecnologías por la entidad gubernamental, como los tornillos hidrodinámicos.

Es evidente que la generación hidroeléctrica con bajos caudales y bajas cabezas, no es viable con las tradicionales turbinas tipo Pelton, Francis o Kaplan, pues estas se sugieren en muchos gráficos de selección de turbinas para capacidades instaladas superiores a los 200 kW, tal como se aprecia en la figura (2). Se aprecia entonces como los tornillos hidrodinámicos se ubican como alternativas adecuadas para bajas capacidades de generación instaladas, con caudales sugeridos alrededor de 1 m³/s y caídas entre 1 m y 10 m.

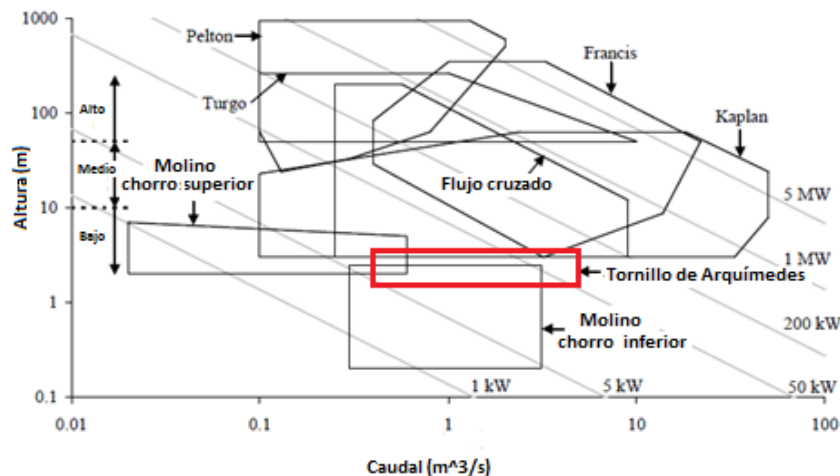


Figura 2. Rangos de implementación de turbinas, editada por Juan Manuel Toro B. (S.J. Williamson, 2011)

Los tornillos de generación hidrodinámicos son viables técnicamente con caídas mínimas de agua en comparación con las requeridas por turbinas convencionales. Esto es porque requieren excavaciones y presas de menores dimensiones comparado con lo que requerirían turbinas usuales para poder operar. Son máquinas que tienen una alta eficiencia de generación en un rango mayor de operación, donde llegan a valores mayores al 90 % con afectación mínima por variaciones en el caudal y su eficiencia es creciente en todo el intervalo, como lo sugiere la figura (3). Adicionalmente se evidencia que es una tecnología de generación con altas eficiencias en una amplia variación de los caudales (20 %-100 %).

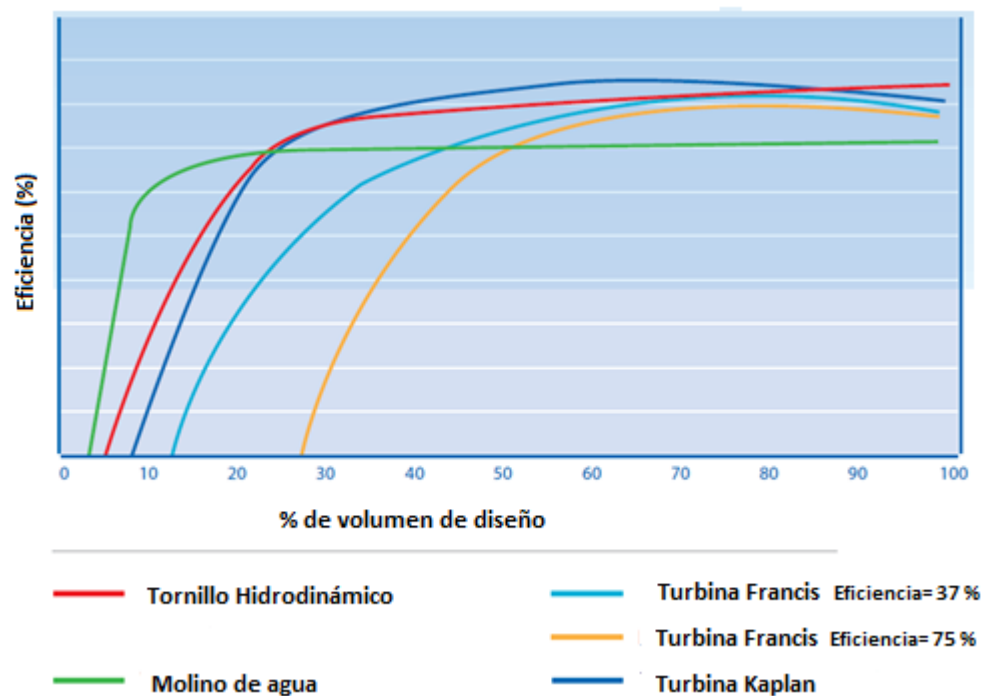


Figura 3. Eficiencia de generación de diferentes tipos de generadores (Andritz), editado por Juan Manuel Toro Bedoya

Los proyectos de hidroeléctricos de generación dotados de turbinas afectan la dinámica de transporte de partículas sólidas en los cauces que intervienen, esto tiene implicaciones, tanto en el impacto ambiental, como en el deterioro sobre las partes móviles en contacto con el agua de los generadores. El uso de tornillos hidrodinámicos resuelve esta situación en gran medida, pues permite el paso de partículas sólidas de tamaños considerables y el impacto de desgaste del equipo es reducido.

El uso de turbinas de generación hidroeléctrica generalmente requiere el control del flujo de agua para maximizar eficiencias, lo que significa una política de operación

de los embalses. En contraposición, los tornillos hidrodinámicos se adaptan a las condiciones de flujo existentes y a las frecuencias del mismo, lo que indica facilidad de operación y un amplio rango de situaciones hidráulicas.

Derivado de las ventajas descritas, estos tipos de generadores son equipos que no requieren mucho mantenimiento y tienen largas vidas de servicio, principalmente por las bajas revoluciones a las que operan, pues se reduce sustancialmente el desgaste.

En la Figura 4. **Tornillo hidrodinámico** , editado por **Juan Manuel Toro B.** se observa un esquema de tornillo hidrodinámico, allí se aprecia cómo el agua con una diferencia de altura entre dos puntos es conducida a través de un mecanismo que permite la generación eléctrica.

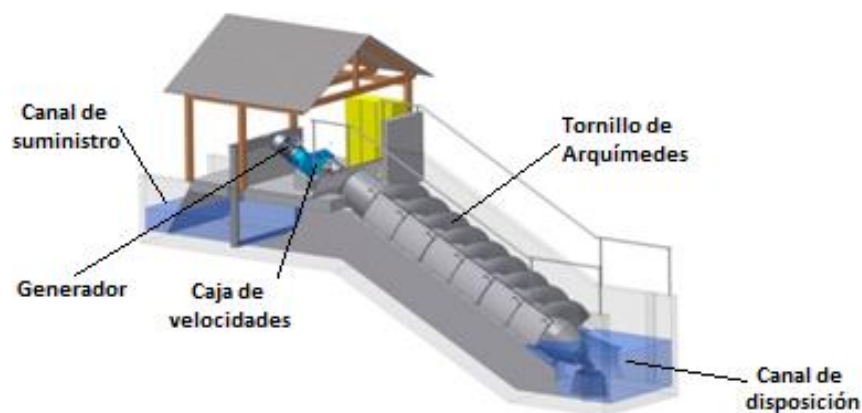


Figura 4. Tornillo hidrodinámico (Andritz), editado por Juan Manuel Toro B.

Es frecuente observar situaciones con potenciales mínimos de generación, con las mencionadas cabezas altimétricas y caudales de baja cuantía. Un ejemplo de esto, tal como se presenta en las denominadas trucheras, donde se cuenta con estanques escalonados donde se mantienen los peces y el agua fluye de un tanque a otro como agua de rebose, como se observa en la Figura 5. La implementación de tornillos hidrodinámicos como alternativa económicamente factible para el aprovechamiento hidroeléctrico de pequeña escala, puede ser posible en estas condiciones si la tasa de incorporación de oxígeno disuelto se conserva, pues es fundamental para los peces. Esta tecnología podría implementarse a su vez en fincas productoras pequeñas con afluentes de agua.



Figura 5. Truchera en el municipio de Jardín, Antioquia (Municipio de Jardín)

La generación hidroeléctrica se ha constituido como uno de los métodos más económicos y amigables con el medio ambiente en el mundo y especialmente en Colombia. Sin embargo estos proyectos requieren la inundación de grandes campos y como consecuencia lleva ciertos impactos ambientales, como destrucción de ecosistemas, generación de espejos de agua, cambios en el microclima, cambios en el transporte de sedimentos y emisión de gases invernadero, entre otros. Adicionalmente, la implementación de proyectos de generación hidroeléctrica con embalses requiere generalmente de obras civiles considerables para lograr una buena caída de agua, donde las presas significan gran parte del costo de construcción del proyecto. Es decir, los costos de construcción de presas son bastante cuantiosos. En otras palabras, los proyectos de generación hidroeléctricos generalmente son viables económicamente, sin embargo requieren de grandes inversiones iniciales que dificultan su desarrollo. Los inconvenientes descritos son solucionados en buena parte con la implementación de tornillos hidrodinámicos.

Los tornillos hidrodinámicos podrían constituir una oferta más económica de suministro eléctrico para fincas que lo requieran con diferentes actividades productivas como por ejemplo iluminación artificial de plantas, corte mecanizado de pastos, bombeo de aguas, ordeño automatizado y hornos para el secado de frutos, entre muchas otras actividades. La construcción de un proyecto de generación de este tipo permitiría suplir total o parcialmente la demanda eléctrica de dichas entidades productivas, buscando economía frente a las tarifas comerciales de electricidad de la red eléctrica pública, siempre y cuando se cuente con un horizonte de medio a largo plazo para solventar las inversiones en infraestructura.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo General

Analizar la viabilidad técnica y económica de los tornillos hidrodinámicos como alternativa de generación eléctrica en Colombia para situaciones de pequeña escala.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar proyectos representativos de generación hidroeléctrica a partir de tornillos hidrodinámicos.
- Determinar las variables que inciden para el diseño de un proyecto de generación con tornillo hidrodinámico: caso de estudio quebrada El Chuscal.
- Analizar las posibles afectaciones ambientales: caso de estudio quebrada El Chuscal.
- Diseñar técnicamente un proyecto de generación de tornillo hidrodinámico: caso de estudio quebrada El Chuscal.
- Realizar análisis económico de un proyecto de generación mediante tornillo hidrodinámico: caso de estudio quebrada El Chuscal.

1.3 MARCO DE REFERENCIA

1.3.1 MARCO CONTEXTUAL

Para llevar a cabo la construcción de un tornillo hidrodinámico, se deben realizar los mismos estudios que para cualquier proyecto de generación de energía, es por esto que temas como el S. I. N. (Sistema Interconectado Nacional) debe abarcarse y saber cuáles son los requisitos que debe tener la energía generada, para cumplir con la calidad requerida y ser parte del sistema, deben tenerse en cuenta además los proyectos de ley o movimientos que haya en el país para la elaboración de un generador de energía hidráulica, también es importante tomar en consideración temas como la descripción del sistema eléctrico colombiano y ver qué tan factible es entrar en esta industria de la producción de energía, con una tecnología nueva para el país como lo es un tornillo hidrodinámico.

A continuación, se profundiza un poco en lo mencionado:

El Sistema Interconectado Nacional es el encargado del suministro de la electricidad en el país, este tiene una capacidad instalada de 14 362 MW para el inicio de este año, dentro de esta cifra, se aprecia una disminución de 0,4 % en comparación con el final del 2012, pues para este año la capacidad instalada fue de 14 420 MW. Esta disminución se debe principalmente a las termoeléctricas que hacen parte del

Sistema Interconectado Nacional, pues algunas plantas renovaron sus formas de combustión, adoptando los principales combustibles que respaldan la obligación de energía firme para el cargo por confiabilidad, la descripción de esta disminución, se puede apreciar claramente en la Tabla 2.

Tabla 2. Capacidad efectiva neta del SIN (Expertos en Mercados)

Recursos	2011 MW	2012 MW	Participación %	Variación (%) 2012 - 2011
Hidráulicos	9,185	9,185	64.0%	0.0%
Térmicos	4,545	4,426	30.8%	-2.6%
Gas	3,053	2,122		
Carbón	991	997		
Fuel - Oil	314	0		
Combustóleo	187	307		
ACPM	0	678		
Jet1	0	46		
Gas-Jet A1	0	276		
Menores	635	693	4.8%	9.1%
Hidráulicos	533	591		
Térmicos	83	83		
Eólica	18	18		
Cogeneradores	55	57	0.4%	4.6%
Total SIN	14,420	14,361	100%	-0.4%

Centrados únicamente en la participación hidroeléctrica en el S. I. N., dicha porción la componen 6 empresas como se aprecia en la Tabla 3:

Tabla 3. Sistema hidrológico del S. I. N. (Expertos en Mercados)

OPERADOR	CENTRAL	EMBALSE	RÍO
EPSA	ALBAN	ALTOANCHICAYA	ALTOANCHICAYA
			DIGUA
	CALIMA	CALIMA1	CALIMA
	SALVAJINA	SALVAJINA	CAUCA SALVAJINA
	PRADO	PRADO	PRADO
EMGESA	BETANIA	BETANIA	MAGDALENA BETANIA
	GUAVIO	GUAVIO	GUAVIO
	PAGUA	AGREGADO BOGOTA (SISGA-NEUSA-TOMINE)	BOGOTA N.R.
		MUNA	BLANCO
		CHUZA	CHUZA
CHIVOR	CHIVOR	ESMERALDA	BATA
EPM	GUATAPE	PENOL	NARE
	GUATRON	TRONERAS	CONCEPCIÓN
			DESVIACIONES EEPPI (NEC,PAJ,DOL)
			GUADALUPE
	MIRAFLORES		TENCHE
	LA TASAJERA	RIOGRANDE2	GRANDE
	PLAYAS	PLAYAS	GUATAPE
	PORCE II	PORCE II	PORCE II
ISAGEN	PORCE III	PORCE III	PORCE III
	JAGUAS	SAN LORENZO	A. SAN LORENZO
	MIEL II	MIEL I	MIEL I, DESVIACION GUARINO
	SAN CARLOS	PUNCHINA	SAN CARLOS
URRA	URRA	URRA1	SINU URRA

Como se puede observar en la tabla anterior, se muestran sólo las grandes presas conocidas en Colombia, sin embargo no son las únicas que producen energía para el SIN, además hay pequeñas centrales y picocentrales hidroeléctricas que venden energía al Sistema y estas tienen muy buen apoyo del gobierno. Es por eso que los pequeños productores y nuevos productores tienen muchos beneficios en este aspecto.

La potencia instalada de estos pequeños productores en conjunto corresponden a 693,54 MW, que es una pequeña porción de la producción total y es por eso precisamente que los nuevos empresarios de la energía, siempre tendrán su venta al SIN asegurada, aún sin haber empezado las obras de construcción de su proyecto, siempre y cuando el proyecto esté totalmente avalado, con toda la reglamentación en regla y garantías de construcción del proyecto.

Es importante resaltar que la empresa XM (Expertos en Mercado) es quien opera y administra el mercado eléctrico colombiano.

1.3.2 MARCO TEÓRICO

El diseño de un tornillo hidrodinámico corresponde al diseño de una pieza móvil en contacto con el agua que busca optimizar la producción eléctrica a partir de un caudal disponible. Para ello el diseño se enfoca en la reducción de las fuerzas resistivas, de reducir los caudales de pérdida o de exceso que no repercuten en potencia de generación.

El artículo del profesor C. Rorres (Rorres, 2000) hace un exhaustivo estudio analítico de las condiciones óptimas para lograr los valores de las variables descritas que maximicen la generación.

El artículo ha abordado analíticamente las características geométricas óptimas de un tornillo hidrodinámico, determinando valores como pendientes, número de aspas, relación entre radio externo e interno de las hélices, espaciado entre hélices, lo que indica amplia información desde un punto académico no empírico que permite la maximización de resultados.

El caudal que determinará la capacidad de generación de un tornillo hidrodinámico será categorizado bajo tres categorías (Rorres, 2000):

Q_w : caudal que genera el torque en el tornillo.

Q_g : caudal de filtración entre las hélices del tornillo y el canal.

Q_o : caudal de filtración si el tornillo se llena más allá de su punto óptimo.

Las consideraciones generales descritas serán abordadas con detalle en el desarrollo de este trabajo.

MORFOLOGÍA DE LA CUENCA

La extensión de la cuenca determinará el área sobre la cual se presentarán las lluvias que a su vez determinarán los niveles de escorrentía por cursos de agua superficiales como corresponde al caso de estudio de la quebrada El Chuscal. Adicionalmente la forma del contorno de la cuenca incidirá en los tiempos de concentración de crecientes, sin embargo dicho análisis cobra importancia significativa para proyectos con embalses para analizar los cambios de almacenamiento.

En la Figura 6. Cuenca quebrada El Chuscal se presenta un plano en planta de la cuenca El Chuscal, donde se observan sus divisorias de aguas y las de las cuencas vecinas. Se aprecia que la quebrada El Chuscal corresponde a un curso de agua con índice de Horton igual a 2. Esto indica que es un cauce joven en cuanto a la distancia respecto a los nacimientos de agua que lo alimentan.



Figura 6. Cuenca quebrada El Chuscal. (Ángel Sanint, Mesa Sánchez, & Rubiano Ortégón, 1988)

En la Figura 7 se muestra con más detalle la cuenca de la quebrada el Chuscal:

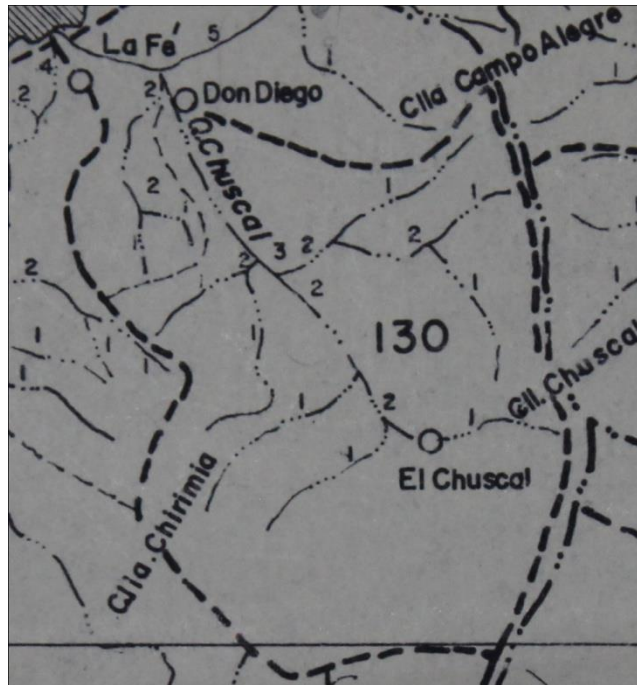


Figura 7. Detalle Cuenca quebrada El Chuscal. (Ángel Sanint, Mesa Sánchez, & Rubiano Ortégón, 1988)

Límite Región Cornare	— . — . — . — .
Límite Municipios	— . . . — . . .
Límite Cuencas	—————
Límite Subcuencas	— — — — —
Límite	— — — — —
Ríos	—————
Quebradas	— . . . — . . .

Figura 8. Convenciones planos de cuenca quebrada El Chuscal. (Ángel Sanint, Mesa Sánchez, & Rubiano Ortégón, 1988)

DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE HIDROSIG

Mediante un modelo de elevación digital del terreno y el modelo digital de las direcciones de flujo de escorrentía se traza la cuenca asociada a la quebrada El Chuscal para el punto del proyecto. La información tratada a continuación proviene de la base de datos Atlas Cornare. (CORNARE, 2009)

En la Figura 9 se aprecian tres cuencas diferentes. Una de ellas es asociada al río Negro en la estación de medición de nombre Montenevado con un área de 199 km². La cuenca denominada Guarango corresponde a la asociada al río Pantanillo en la estación Guarango de medición de caudales, con un área de 38,97 km². Finalmente

la cuenca asociada al punto del proyecto, sobre la quebrada El Chuscal, con un área de 18,62 km².

De las primeras dos cuencas se tiene información de registro de caudales y corresponden a las estaciones de medición más cercanas. Se decide trabajar con la información de la estación Guarango por tratarse a una cuenca de tamaño más aproximado. Adicionalmente corresponde a una corriente con características similares, bastante próxima en distancia pues esta se encuentra en el municipio de El Retiro, cerca de su cabecera y se presume similitud hidrológica.

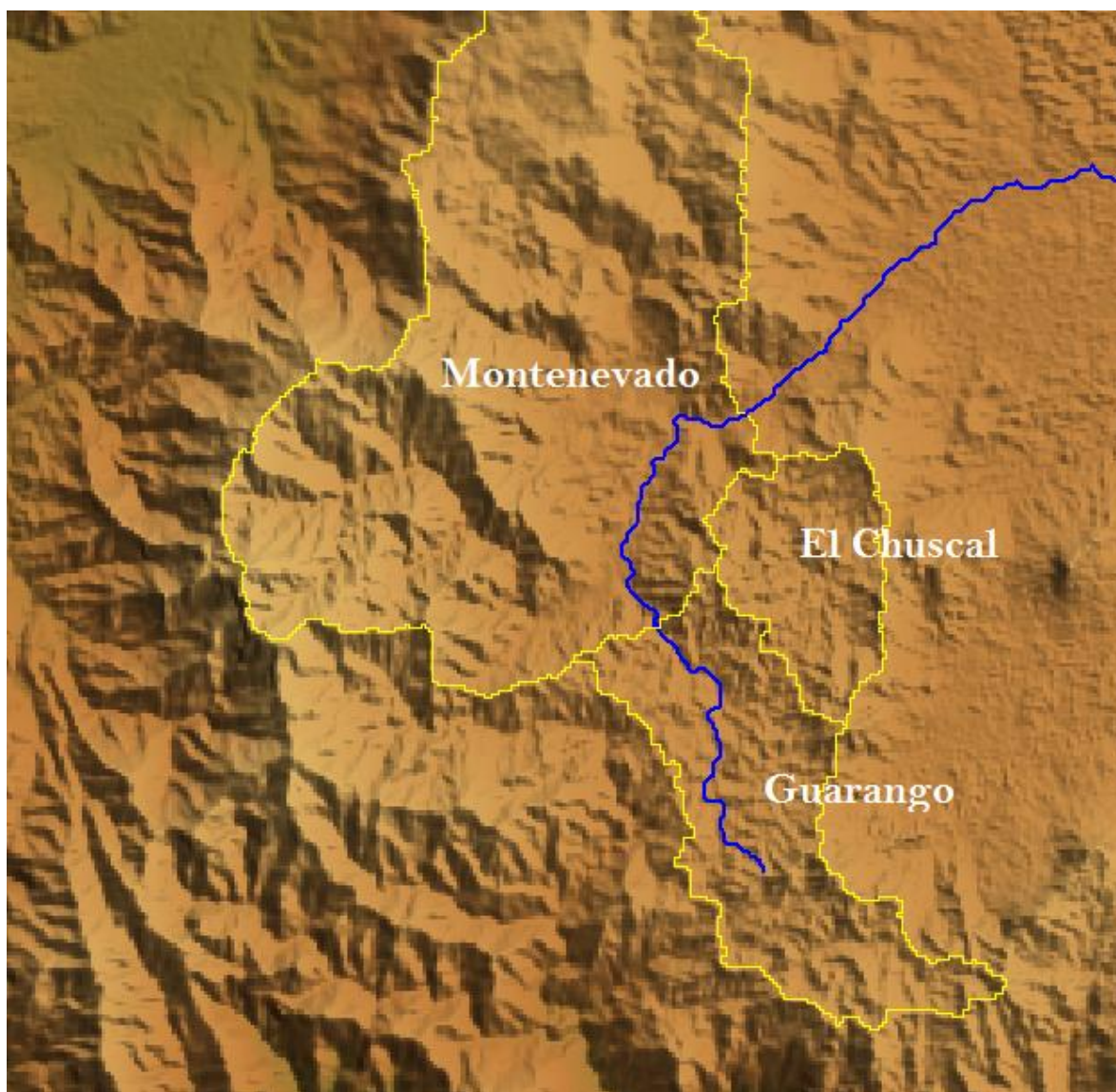


Figura 9. Cuenca quebrada el Chuscal (Hidrosig)

Curva De Duración De Caudales y ciclo anual

Con la ayuda del Atlas de Cornare, se cuenta con información de medición de caudales sobre la estación de nombre Guarango entre el 17 de agosto de 1999 y el 30 de septiembre de 2008 con resolución diaria.

Si bien no se cuenta con información de medición de caudales sobre la quebrada El Chuscal puede generarse una serie de caudales sintética con la suposición de una relación directa entre el caudal medio de las dos corrientes, río Pantanillo y quebrada El Chuscal. Dicha serie se presenta a continuación en la Figura 10.

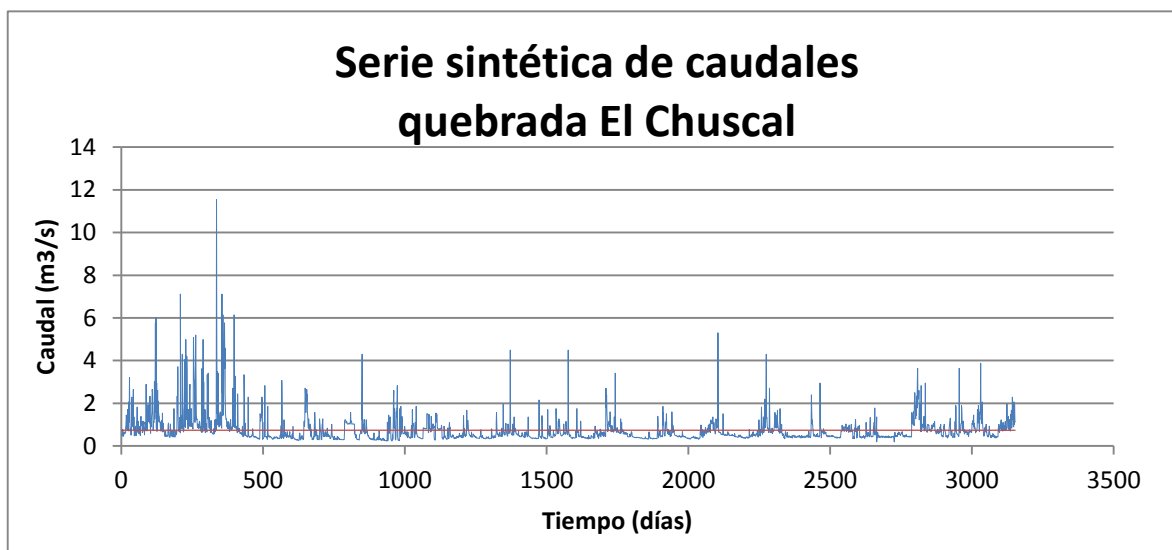


Figura 10. Serie sintética de caudales (quebrada El Chuscal).

Contando con la gráfica de la serie sintética de caudales se puede construir la curva de duración de caudales. Se construye la gráfica de duración de caudales del río Pantanillo y la quebrada El Chuscal y se presentan en la Figura 11:

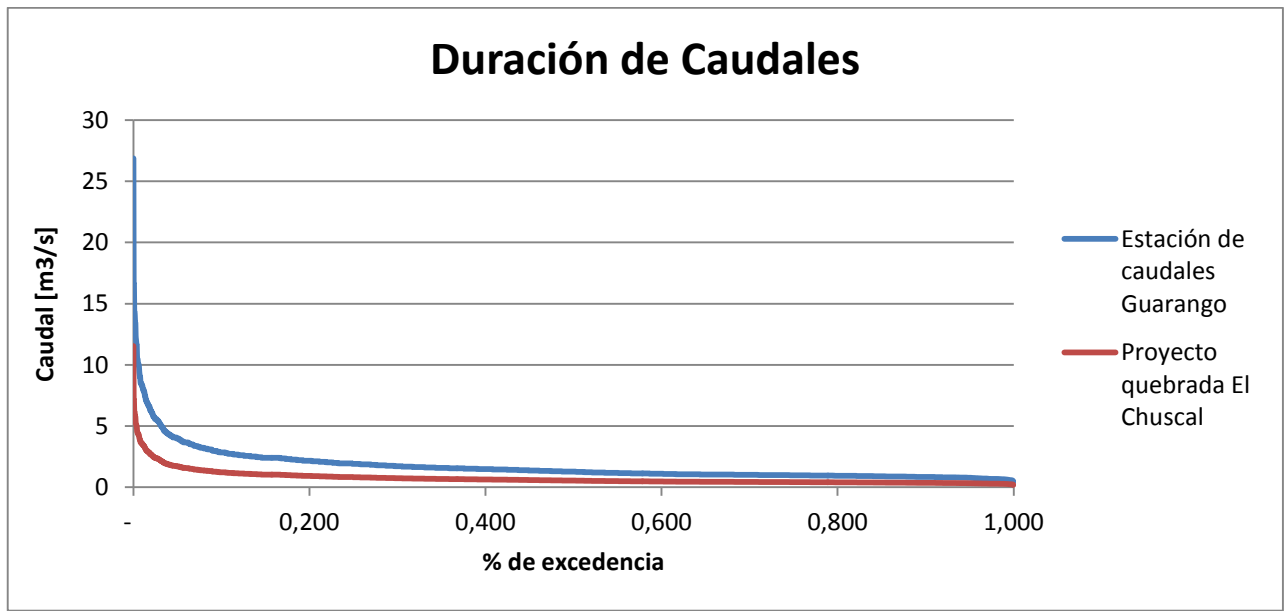


Figura 11. Curva de duración de caudales

De la Figura 11 anterior puede obtenerse el caudal que se sostiene cierto porcentaje de tiempo. Es común que se trabaje con un caudal asociado a un porcentaje del 5 % de excedencia en el tiempo, lo cual corresponde a lo regulado como energía firme en Colombia. Dicho caudal de la serie sintética corresponde a $0,775 \text{ m}^3/\text{s}$.

Adicionalmente, se construye la gráfica de ciclo multianual de caudales, con la finalidad de conocer la variación del flujo de agua ante los fenómenos hidroclimáticos. Los resultados se presentan en la Figura 12.

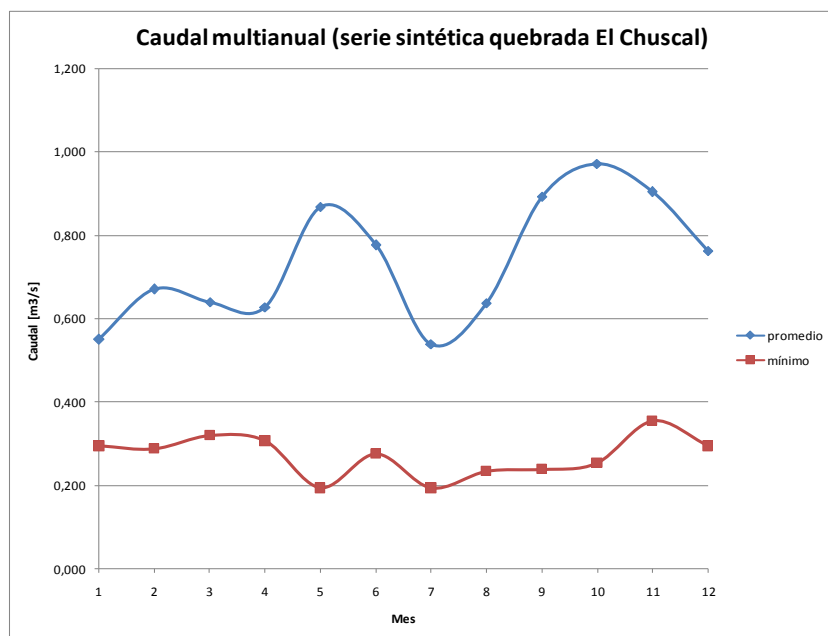


Figura 12. Caudales mensuales multianuales (a partir de serie sintética quebrada El Chuscal)

Puede apreciarse que los caudales de la serie sintética para el punto de obras presenta un comportamiento bimodal para los valores medios de caudal, siguiendo el patrón de lluvias de la región andina. Esto es un aspecto favorable para el proyecto pues simplifica el estudio de presencia de caudales y evita riesgos asociados a variabilidad climática. Adicionalmente indica que el caudal de diseño se ubica cercano a la curva de caudal medio del ciclo anual pero por la zona inferior, dando confiabilidad de generación.

CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL DE LA QUEBRADA EL CHUSCAL

La cuenca de la quebrada El Chuscal es relativamente pequeña. El recorrido de la quebrada presenta pendientes bastante suaves en un tramo correspondiente a aguas arriba del salto Tequendamita el cual se localiza a menos de mil metros del punto de obras. El salto representa un punto de quiebre del perfil de la quebrada pues a partir del Tequendamita la quebrada presenta un tramo de pendientes pronunciadas a medida que discurre por terrenos rocosos.

La situación descrita se aprecia con ayuda de la Figura 13 donde se visualiza en planta la quebrada El Chuscal con un trazo hecho manualmente en color azul.



Figura 13. Vista en planta de tramo final de la quebrada El Chuscal (Google Earth)

La Figura 14 permite visualizar las características del perfil de la quebrada El Chuscal. Debe resaltarse que este perfil es construido mediante el software de uso libre Google Earth y su precisión altimétrica es bastante pobre, no obstante permite tener una idea aproximada del perfil altimétrico de la quebrada El Chuscal. El abscisado del perfil comienza en la desembocadura de la quebrada en el río Pantanillo a la altura de Don Diego y crecientemente hacia aguas arriba. El salto del Tequendamita se localiza en la abscisa 1,3 km aproximadamente y allí se aprecia como el curso de agua comienza a tener pendientes pronunciadas. El sitio de localización del tornillo corresponde al señalado con 456 m y se aprecia que en dicho sector se presentan igualmente pendientes pronunciadas. Se indica que el perfil de la quebrada debería ser monótonamente descendiente para la escala de dibujo, sin embargo aquellos puntos donde el perfil va en contravía de este hecho corresponde a la falta de precisión del software o a las equivocaciones concernientes al trazo manual en planta de la quebrada.

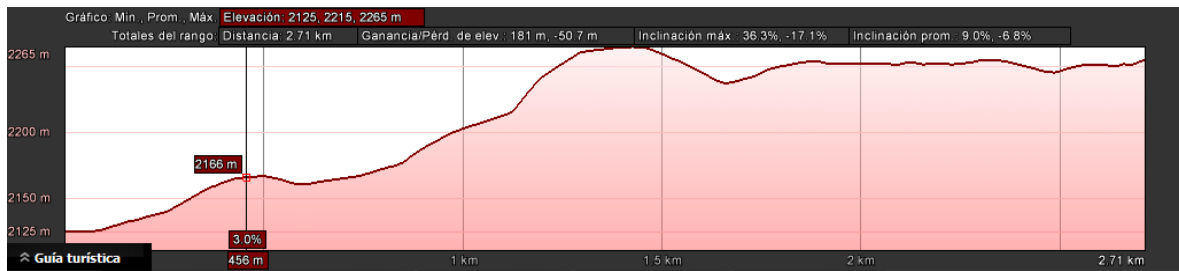


Figura 14. Perfil de tramo final de la quebrada El Chuscal (Google Earth)



Figura 15. Quebrada El Chuscal en el sitio del proyecto

La localización del proyecto en esta zona de altas pendientes de la cuenca favorece la presencia de cabeza de altura propia para la generación y a su vez corresponde a terrenos con buenas propiedades de control geológico para el cauce del río, garantizando el trazado de la quebrada y repercutiendo en menores obras de control y menores costos. Adicionalmente significa contar con sustrato firme para el anclaje de las obras civiles.

2. METODOLOGÍA

El proyecto se desarrolla como trabajo de grado de carácter exploratorio, partiendo de la recolección de información de carácter cualitativo y cuantitativo sobre los requerimientos técnicos de las cuencas que pueden ser objeto de estudio para la implementación de tornillos hidrodinámicos como alternativa de generación

hidroeléctrica que sea factible técnica, ambiental y económicamente. Se desarrollarán las siguientes cinco etapas:

ETAPA I. ESTUDIO DE PROYECTOS REPRESENTATIVOS EJECUTADOS

Esta etapa del proyecto permitirá la recolección de bibliografía acerca de proyectos de implementación de tornillos hidrodinámicos. Como se pretende determinar la aplicabilidad de esta tecnología en Colombia se seleccionarán casos que sean característicos de las condiciones de nuestro país y para las condiciones descritas en la caracterización del problema. Se identificarán las variables técnicas determinantes de cada proyecto, primordialmente en el ámbito geomorfológico e hidrológico. Se indagará sobre el uso que se da a la energía en cada proyecto.

ETAPA II. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DE DISEÑO

Se busca profundizar sobre las necesidades técnicas de sitio que permitan la instalación de tornillos hidrodinámicos. Esta etapa pretende analizar las características geomorfológicas e hidrológicas, con la finalidad de determinar el grado de incidencias de las dos variables principales, caudal y altura, sobre la variable objetivo principal, la capacidad instalada sobre la quebrada El Chuscal en el municipio de El Retiro.

ETAPA III. ANÁLISIS DE POSIBLES AFECTACIONES AMBIENTALES

Se realizará un análisis basado en los proyectos antecedentes estudiados de las ventajas y desventajas en materia ambiental de los tornillos hidrodinámicos, tanto de carácter cualitativo como cuantitativo. Se abordará entonces el tema de transporte de sedimentos y tránsito de peces de manera comparativa con generación hidroeléctrica a partir de turbinas convencionales para el caso de estudio.

ETAPA IV. DISEÑO TÉCNICO

Se realizarán los diseños hidráulicos y estructurales para un proyecto de generación eléctrica con tornillo hidrodinámico: caso de estudio quebrada El Chuscal. Se cobijarán los aspectos de diseño geométrico del tornillo.

ETAPA V. ANÁLISIS ECONÓMICO

Se realizará una evaluación económica del proyecto y el respectivo análisis que sugiera o no la viabilidad económica: caso de estudio quebrada El Chuscal.

3. DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 IDENTIFICACIÓN DE PROYECTOS REPRESENTATIVOS EJECUTADOS

La identificación de proyectos representativos, se realizará para dos proyectos ubicados en el Reino Unido. Se decidió realizar el estudio de un proyecto de gran escala y otro de pequeña escala.

3.1.1 *Tees Barrage White Water Course Upgrade* (Reforma Al Dique Del Río Tess).

Descripción General

Este es uno de los proyectos con tecnología de generación hidroeléctrica a partir de tornillos hidrodinámicos más reconocidos en el mundo. Fue construido como infraestructura deportiva para los juegos olímpicos de Londres 2012 y paraolímpicos del mismo año. Las empresas a cargo de la construcción de este proyecto de generación de energía fueron la firma Holandesa Spanns Babcock y JP Bentley Ltda. Spanns Babcock, suministró el tornillo y realizó la instalación del mismo, pero el ingeniero civil Mott MacDonald de la firma JP Bentley fue el elegido para realizar el diseño del proyecto. Las funciones definidas durante la licitación pública que debía realizar la empresa JN Bentley, son las siguientes:

- El transportador para permitir la transferencia de los piragüistas desde la piscina inferior a la piscina superior, sin necesidad de salir de sus barcos (lo que permite el uso continuo de la instalación).
- Sistema de control completamente automatizado para operación de generación y bombeo.
- Integración del transformador para permitir que la energía generada alimente la red nacional.
- Diseño de tubería hasta la estación de bombeo para permitir el uso eficaz de los tornillos de Arquímedes.

Algunas de las funciones mencionadas se pueden observar claramente en la Figura 16, dónde se muestra la localización de los tornillos, en el canal artificial del río Tess.



Figura 16. Tess barrage white water course (dique de río Tess).

Este proyecto es único en el mundo, pues los implementos de generación instalados tienen doble función: generación de energía y bombeo de agua. No sobra mencionar que ambas funciones no pueden ser ejecutadas al mismo tiempo, pues el mismo artefacto en direcciones opuestas genera energía o bombea agua.

Es un proyecto con una capacidad de generación instalada de 524 kW, conformado por 4 tornillos hidrodinámicos. Cada uno con una longitud de 12 m y un diámetro de 3,1 m. suficiente para suministrar electricidad al menos a 140 casas de tamaño y consumo normal en el Reino Unido.

Este proyecto fue realizado como una atracción para los amantes de los deportes extremos acuáticos y como una opción alternativa de generación, pero estos propósitos fueron trocados una vez fue puesto en funcionamiento el proyecto. Hoy en día el proyecto es principalmente usado para la generación y como segunda opción es atracción deportiva.

Localización

El ambicioso proyecto bifuncional se encuentra ubicado en la orilla norte del río Tess, junto a la presa Tess, en la ciudad de Middlesbrough en el noreste del Reino Unido. Su ubicación dentro de la ciudad se puede apreciar en la Figura 17.

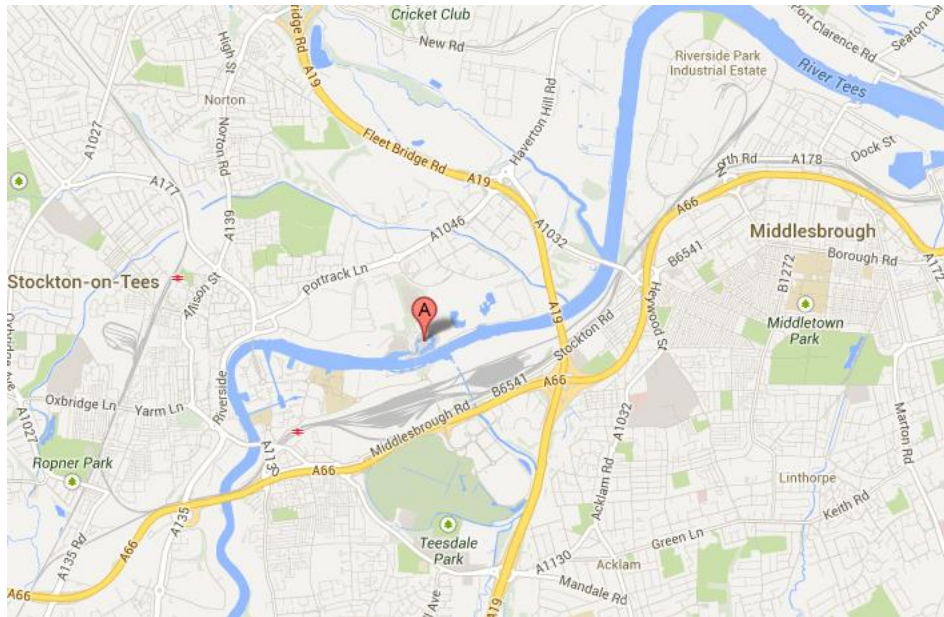


Figura 17. Ubicación proyecto de interés

El proyecto está ubicado en las coordenadas geográficas (54°33'57.15"N, 1°17'6.54"O) WGS1984, sobre el río que separa las localidades de Yorkshire y Durham.

Tiene una altura sobre el nivel del mar de 3 metros aproximadamente. Aguas abajo del proyecto del dique de río Tess, se encuentra el mar del Norte, donde desemboca el río, aproximadamente a 13 km del lugar de estudio.

La forma del canal artificial dónde se encuentran los implementos de generación y bombeo puede apreciarse en la imagen satelital de lugar que se muestra a continuación en la Figura 18.



Figura 18. Imagen satelital canal río Tess

Hidrología

El río Tess tiene una longitud aproximada de 136 km. Cuenta con un desnivel topográfico de 760 m entre su nacimiento y su desembocadura, en Cross Fell (montes Peninos) y el mar del Norte, respectivamente. El río, en la última parte de su recorrido, es un importante curso para la navegación. El río cuenta con dos importantes puertos para la ciudad de Londres, como lo son Stockton-on-Tees y Middlesbrough.

La cuenca del río Tess. Con una cobertura de 1874 km² es una de las más importantes del Reino Unido. En la corta longitud de su recorrido, se ubican dos presas. La presa del río Tess, dónde se encuentra el proyecto de generación y la presa Cow Green Reservoir, ubicada al inicio del recorrido, cerca al nacimiento del río.

Algunos de los afluentes del importante río son el río Balder y los arroyos Clow, Spa, Canny Well, Dalton, entre otros.

3.1.2 Proyecto Morden Hall Park

Descripción General

El Morden Hall Park fue el primer proyecto de generación hidroeléctrica de la ciudad de Londres. Corresponde a un tornillo producido en Holanda (por la firma Spanns

Babcock), el cual comenzó su operación el 2 noviembre de 2012 (Sustainable Merton).

El proyecto fue construido sobre la antigua infraestructura de un molino de agua que data del siglo 18 (Tuffrey, 2013). Es decir, se aprovechó una pequeña presa que genera un desnivel de 1,2 m de altura. A través de un canal que rodea la presa se dispuso el tornillo, de esta forma el cauce principal del río conserva su trazado y es sobre la derivación donde se instalaron los equipos. Debe decirse que esta práctica reduce el riesgo de incidentes sobre el tornillo ante crecientes de cierta magnitud, pues estas seguirían su paso sobre el cauce principal. La situación descrita se aprecia en la Figura 19 Y Figura 20



Figura 19. Ubicación canales de derivación, Google Maps



Figura 20. Tornillo Hidrodinámico de Morden Hall Park, (Natioal Trust)

La potencia instalada corresponde a 8,5 kW y una vida útil estimada de 60 años para la pieza de 2,5 toneladas (Tuffrey, 2013).

El proyecto fue diseñado para suplir el consumo del parque en el que se encuentra ubicado, además de proveer a la red nacional con la energía de exceso. (Tuffrey, 2013).

Localización

Ubicado en la ciudad de Londres, Reino Unido en la coordenadas geográficas (51° 24' 7,59'' N, 0° 11' 15,19'') WGS1984. Al sur de la ciudad de Londres. En la margen izquierda del río Wandle. Sobre un parque público llamado Modern Hall, este es una reserva natural con una extensión de 50 Ha aproximadamente. En la Figura 21, puede apreciarse la localización del proyecto dentro de la ciudad de Londres.

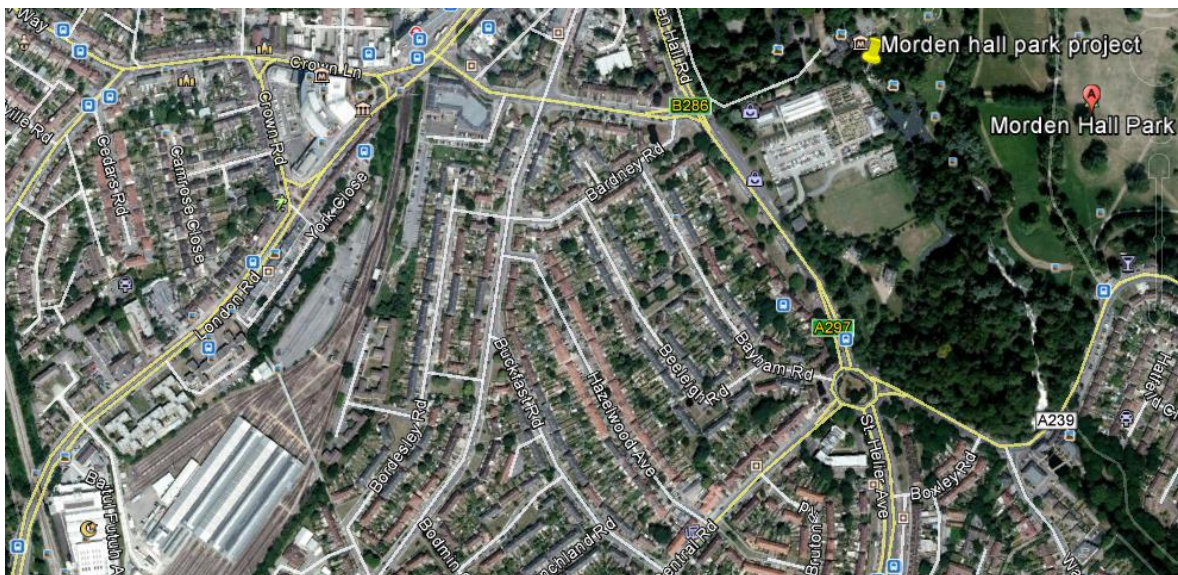


Figura 21. Morden Hall Park. Tomado de Google Earth.

El primer tornillo hidrodinámico de Londres se construyó bajo un proyecto de inversión de £990.000 del Heritage Lottery Fund para transformar el parque Morden y su antigua infraestructura en un centro para visitantes y con el objetivo de ser el edificio más eficiente en uso de energía en el país (Heritage Lottery Fund, 2012)

Hidrología

El río Wandle corresponde a un curso de agua de 14 km de longitud aproximadamente y con una elevación promedio de 35 m. s. n. m. este tiene su nacimiento dentro de la ciudad de Londres a la altura del parque "The Grove" y su

caudal proviene de un acuífero subterráneo. Su desembocadura ocurre sobre el río Támesis a la altura de “Smugglers Way Solid Waste Transfer Station”.

El caudal medio del río corresponde a 1,7 m³/s. Se presentó un valor de creciente máxima registrado de 39,3 m³/s en septiembre de 1968 y un valor mínimo registrado de 0,22 en enero de 1963.

Este río no tiene ningún afluente durante su corto recorrido.

3.2 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DE DISEÑO

En el análisis de las variables de diseño se tendrán en cuentas los factores naturales que inciden en el diseño técnico del tornillo. Tales como caudales de diseño, ecológico, máximo y mínimo. Hidrología de la cuenca, topografía de la cuenca.

Con el fin de analizar a profundidad la ecuación de la capacidad instalada de un generador.

$$P = \eta * \rho * g * Q * H \quad \text{Ecuación (2)}$$

P= Potencia

η = Eficiencia

ρ = Densidad del agua

Q= Caudal

H= Cabeza de generación

Todas las variables mostradas en la ecuación (2) a excepción de la eficiencia dependen de las condiciones del lugar (hidrológicas y de sitio).

3.2.1. Densidad Del Agua

La densidad del agua aunque su variación es muy pequeña, depende de factores como la temperatura del agua. En la Figura 22 y la Tabla 4 se aprecia dicha variación, según su temperatura.

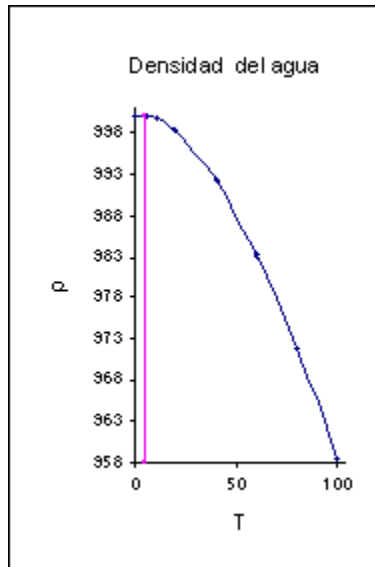


Figura 22. Gráfica variación de densidad con la temperatura (Escuela de Ingeniería de Antioquia)

Tabla 4. Variación de densidad del agua con la temperatura (Escuela de Ingeniería de Antioquia)

Temperatura	Densidad
°C	kg/m ³
0	999.9
4	1000.0
10	999.7
20	998.2
40	992.2
60	983.2
80	971.8
100	958.4

La temperatura varía de acuerdo con el clima, uno de los principales componentes de la geomorfología de la zona.

3.2.2. Aceleración De La Gravedad

La aceleración de la gravedad, aunque es conocida con el valor de 9,81 m/s² esto no es del todo cierto. La aceleración de la gravedad al igual que la temperatura del agua es variable y varía dependiendo del posicionamiento geográfico.

La gravedad varía debido a dos factores, la altura sobre el centro de la tierra y la latitud o distancia desde el ecuador hasta los polos.

Para el cálculo de la aceleración de la gravedad es necesario entonces hacer un valor medio entre los valores de posición geográfica y altura.

En las siguientes ecuaciones puede observarse la forma de calcular la aceleración de la gravedad dependiendo de la latitud y la altura respectivamente.

$$g_{\phi} = 9,780327 (1 + 0,0053024 \operatorname{sen}^2 \phi - 0,0000058 \operatorname{sen}^2 2\phi) \text{ m/s}^2$$

g_{ϕ} = aceleración de la gravedad en la latitud ϕ

ϕ = latitud de interés

$$g_h = g_o \left(\frac{r_e}{(r_e + h)} \right)^2$$

g_h = aceleración de la gravedad a la altura de interés.

g_o = aceleración de la gravedad a nivel del mar en el ecuador.

r_e = radio promedio de la tierra (6.371.000 m)

h = altura sobre el nivel del mar

Las ecuaciones mencionadas son propuestas por Manuel Ortega R, en el libro lecciones de Física 2004.

La aceleración de la gravedad depende entonces del factor geomorfológico posicionamiento geográfico, no obstante su variación es mínima y se trabajará con un valor de 9,81 m/s².

3.2.3. Altura (cabeza de generación)

La altura o cabeza de generación es quien dicta la energía potencial gravitacional que se utilizará para la generación de energía eléctrica y esta depende de la topografía de la zona de interés, es decir dependiendo de las formaciones geológicas del lugar se puede obtener una caída de agua de cierta magnitud.

Esta es una de las variables más importantes en términos de generación junto con el caudal. Debido a que variables como la aceleración de la gravedad y la densidad del agua pueden considerarse constantes con un orden de $9,81 \text{ m/s}^2$ y 1.000 kg/m^3 respectivamente. La potencia será entonces en mayor parte brindada por las variables caudal y altura.

La altura depende principalmente de la topografía del sitio.

3.2.4. Caudal

El caudal se refiere al volumen de cierto fluido que pasa por una sección en un tiempo determinado.

El caudal de cierto curso de agua puede calcularse con la ecuación que se presenta a continuación.

$$Q = v * A$$

Q: caudal

v: velocidad

A: área

Como se aprecia el caudal depende de la velocidad, variable quien aporta el componente de energía cinética.

Es por esto que el caudal es quien brinda la parte de la generación que corresponde a energía cinética. Es entonces en este punto dónde se sabe que la energía total que se generará depende de la altura (energía potencial gravitacional) y del caudal (energía cinética).

El caudal de una quebrada depende exclusivamente de las variables hidrológicas de la zona. Algunas de estas variables corresponden a lluvias, área de la cuenca, elevación de la cuenca, etc.

3.2.5. Eficiencia

Remitiéndose

a

la

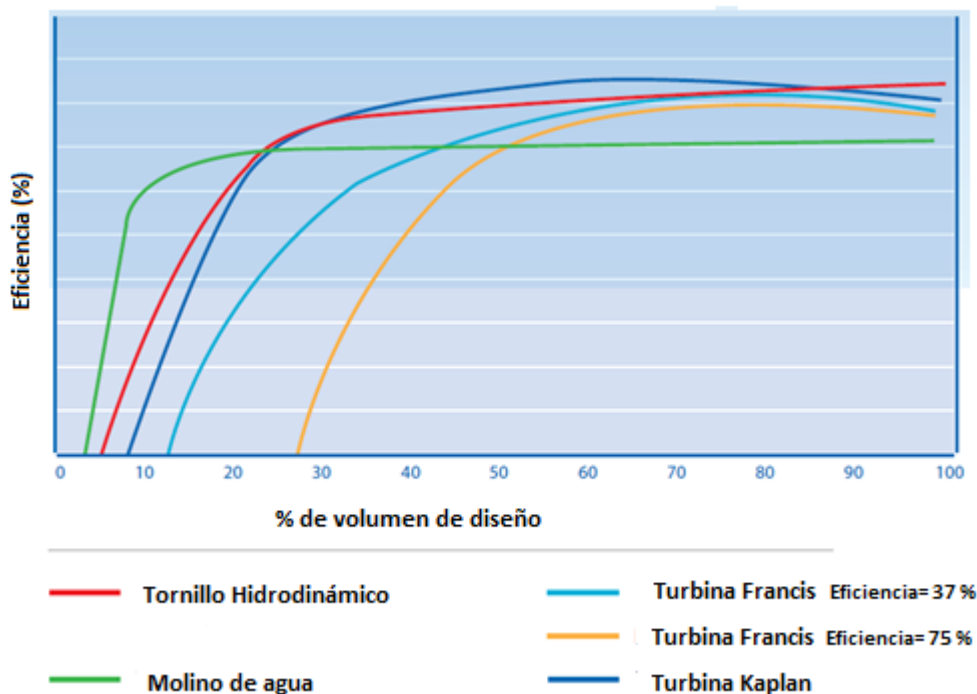


Figura 3, se

aprecia la variabilidad de la eficiencia de la tecnología de tornillos hidrodinámicos. Se observa como la eficiencia de generación se sostiene en valores elevados para un gran rango de caudales hasta aquel de diseño, podría decirse que a partir de una inspección visual de la grafica, para valores superiores al 35 % del caudal de diseño se cuenta con buenos valores de eficiencia.

Esta variable cobra importancia significativa si se trata de cuantifica la producción de energía a lo largo del año, donde el proyecto tendrá que trabajar ante variaciones de caudales. Corresponde entonces a un factor favorable pues la energía generada con caudales menores no repercute en producciones aun menores por concepto de reducción de eficiencia en los equipos.

3.3 ANÁLISIS DE POSIBLES AFECTACIONES AMBIENTALES

Los principales aspectos ambientales que se tendrán en cuentan serán:

- Amabilidad del tornillo con los peces.
- Paso libre de sedimentos por el elemento de generación.
- Aspectos socioeconómicos.

Se debe tener en cuenta que no se pretende hacer un estudio de factibilidad ambiental, únicamente se considerarán algunos aspectos generales y beneficios que el generador pueda aportar al medio ambiente.

3.3.1 Amabilidad Del Tornillo Con Los Peces

Existe una cantidad considerable de literatura que aporta información valiosa acerca del tema de la amabilidad del tornillo hidrodinámico con el paso de peces. Así que se referenciará un estudio ya realizado, por investigadores que han dedicado llevar a cabo un análisis muy detallado del tema.

El estudio que se tendrá en cuenta para la ejecución de este trabajo, será un estudio realizado para el proyecto de generación de energía ubicado en el río Dart. El estudio es llamado. "Fish Monitoring and Live Fish Trials. Archimedes Screw Turbine, River Dart", por la firma "Fish tech consulting Ltda".

El tornillo hidrodinámico instalado en Devon, fue el primer generador de este tipo que se instaló en el Reino Unido. Este proyecto fue monitoreado por EA (Environment Agency) y "Panel Pass Fish", durante un año, para ver qué tan cierto es que este tipo de proyectos son amigables con los peces.

El paso de peces por el tornillo se evaluó con especies de peces específicas, como Marrón, Trucha y Arco Iris en gamas de pesos y tamaños entre (10 g y 4400 g, 8 cm y 63 cm). Durante el año de estudio se registraron más de 1.000 pasos de peces a través del generador. La evidencia de tal paso, fue registrada por cámaras acuáticas sumergidas dentro del canal del tornillo. (Bielefeld, 2001).

El 1,4 % de los peces que pasó por la turbina sufrió heridas, pasajeras o permanentes. Se concluyó que el paso por el tornillo era seguro para los peces, en toda la gama de velocidades, hasta 31 r.p.m. (Bielefeld, 2001).

Se concluyó del estudio, que el generador es amigable con los peces debido a 3 aspectos primordialmente: baja velocidad de rotación (entre 28 y 30 r.p.m.). No existen cambios bruscos en la presión y no existen esfuerzos cortantes importantes. En la

Tabla 5 se aprecia que el daño en los peces a ciertas especies no es de ningún tipo.

Tabla 5. Peces capaces de pasar sin sufrir daño alguno, (Bielefeld, 2001)

Species	Size range	Number	Number of fish with damage
Bitterling	4cm-5cm	5	0
Bleak	4cm-5cm	2	0
Bream	3cm-7cm	239	0
Carp	7cm-19cm	11	0
Crucian carp	9cm-14cm	2	0
Gudgeon	11cm-11cm	1	0
Orfe	8cm-14cm	2	0
Pike	39cm-39cm	1	0
Roach	5cm-12cm	9	0
Rudd	4cm-11cm	2	0
Stickleback	1cm-5cm	5	0
Stone Loach	11cm-11cm	3	0
Tench	4cm-20cm	7	0

En la Figura 23 se observa el método de captura de los peces para los estudios de medición y peso, además con el método que se realizó la captura se tiene la seguridad de que todos los peces atrapados son individuos que pasaron el generador.



Figura 23. Captura de individuos, (Bielefeld, 2001)

3.3.2 Paso Libre De Sedimentos Por El Elemento De Generación.

Debido a que el agua no es represada o en caso de que lo sea el represamiento no es de importancia, es decir, es un represamiento muy pequeño, el tornillo permite el paso de la gran mayoría de los sedimentos y materiales gruesos (hasta cierta dimensión) a través de él.

El problema de la interrupción del paso de sedimentos es que aguas abajo del corte llegan consecuencias de carácter ambiental, como pérdida de especies nativas (destrucción de ecosistemas), acumulación de sedimentos (cambio del perfil del suelos del curso de agua), etc.

La acumulación de sedimentos en una presa conlleva a tener que realizar un mantenimiento del fondo regularmente. Si este no se hace puede ocasionar la pérdida definitiva del embalse. En presas de tamaño importante esta acumulación de sedimentos puede tardar mucho tiempo y realizarles un mantenimiento o limpieza, no es viable por los altos costos del proceso. Una vez que este embalse este lleno de sedimentos, dicha retención llegó a su tiempo límite de funcionamiento, al menos que se realice una descarga de fondo con repercusiones de afectación ambiental. La elaboración de un estudio previo de disposición de sedimentos para la construcción de una presa es de vital importancia. Debe hacerse con el fin de alargar al máximo tiempo posible la funcionalidad de la obra de generación.

En la Figura 23, puede apreciarse la acumulación mencionada, además de dónde provienen estos sedimentos que se depositan.



Figura 24. Ciclo de los sedimentos, (Encrypted)

En el caso de la generación por medio de un tornillo hidrodinámico no se presenta acumulación de sedimentos, puesto que deja que los sedimentos corran libremente dentro del tornillo. Así que en un proyecto de generación mediante un tornillo hidrodinámico es necesario al igual que en embalses de gran tamaño hacer estudios acerca de los sedimentos, pero este estudio no definirá un tiempo límite para la ejecución del plan de generación.

Una vez el proyecto esté en funcionamiento, el río o quebrada aguas abajo del proyecto, no se dará cuenta que sobre sí existe un proyecto que requiere su cauce para el funcionamiento.

3.3.3 Aspectos Socioeconómicos

Un proyecto de este tipo, por lo general sólo trae aspectos positivos en una comunidad. Genera empleo durante el tiempo de construcción y conserva algún personal para el mantenimiento y supervisión de los equipos. Posibilita que comunidades escasas de energía eléctrica gocen de los privilegios que trae la electricidad.

Se debe concientizar a las comunidades que harán uso de la electricidad producida, para hacerles entender que dependiendo del uso, el servicio de energía eléctrica será de calidad.

La electricidad, puede despertar de cierta forma la economía de un lugar que ha sido marginada en cuestiones de electricidad, además trae muchos beneficios en cuestiones de salubridad y calidad de vida.

Además el desarrollo de un proyecto aporta impuestos de industria y comercio al municipio dónde se encuentre.

3.4 DISEÑO TÉCNICO

3.4.1 Determinación Del Caudal Medio

Medición Directa

El 12 de agosto de 2013 se realizó una visita técnica al lugar de estudio por parte de los desarrolladores de este trabajo, Juan Manuel Toro Bedoya y Mario Esteban Madrid Wolff como investigadores y Santiago Ortega Arango como director del trabajo de grado.

En sitio se realizaron mediciones de velocidad con correntómetro como se muestra en la Figura 25 para posteriormente realizar el cálculo de caudal de la quebrada.



Figura 25. Mediciones con correntómetro, quebrada El Chuscal.

Las mediciones fueron realizadas sobre la quebrada El Chuscal en las coordenadas $6^{\circ}05'10,9''$ N y $75^{\circ}28'44,4''$ a la altura de un pequeño puente que cruza el cauce.

La sección del cuerpo de agua en dicho punto corresponde 5 metros de ancho. Se dividió la sección en 10 subtramos de 0,5 m cada uno. Sobre ellos se realizaron las mediciones de velocidades a diferentes profundidades y la determinación del contorno del fondo de la quebrada.

Los resultados se observan en la Tabla 6. Se observa que de acuerdo a la profundidad de cada estación de medición se realizaron de 1 a 3 mediciones de velocidades según lo permitió el espacio. Adicionalmente la última fila de la tabla indica los resultados de las velocidades promedio para cada estación.

Tabla 6. Mediciones de profundidad y velocidad de flujo

ESTACIÓN DE MEDICIÓN	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ABSCISA [m]	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
PROFUNDIDAD [m]	0,00	0,30	0,32	0,45	0,57	0,66	0,70	0,55	0,55	0,25	0,00
PROFUNDIDAD LECTURA 1 [m]		0,15	0,11	0,20	0,23	0,26	0,28	0,22	0,44	0,13	
VELOCIDAD LECTURA 1 [m/s]		0,138	0,215	0,358	0,392	0,774	0,308	0,185	0,089	0,056	
PROFUNDIDAD LECTURA 2 [m]			0,20	0,27	0,34	0,40	0,42	0,33			
VELOCIDAD LECTURA 2 [m/s]			0,257	0,405	0,456	0,568	0,526	0,142			
PROFUNDIDAD LECTURA 3 [m]					0,46	0,53	0,56	0,44			
VELOCIDAD LECTURA 3 [m/s]					0,489	0,627	0,524	0,213			
PROMEDIO DE VELOCIDAD [m/s]	0,000	0,138	0,236	0,382	0,446	0,656	0,453	0,180	0,089	0,056	0,000

Posteriormente se procede al cálculo de las áreas de cada subsección, tomando como centro de ellas los puntos de estación. De esta manera se forman 11 subsecciones. Éstas estarán compuestas por un área desde la estación hacia su izquierda y otra hacia su derecha bajo las siglas A.I. y A.D. en la Figura 26 y serán de carácter trapecial. Las estaciones 0 y 10 del cauce sólo contarán con una de las dos subáreas por su condición de puntos extremos.

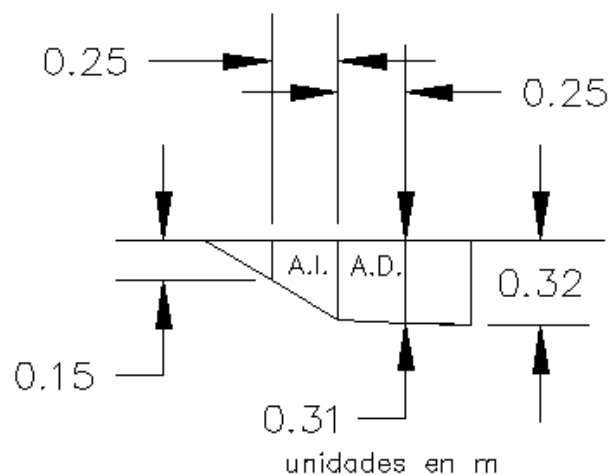


Figura 26. Esquema para el cálculo de subáreas

La Figura 26 muestra un esquema que ilustra el procedimiento para el cálculo de las subáreas transversales de la quebrada en la estación 1, correspondientes a trapecios con base de 0,25 m y alturas correspondientes a las profundidades medidas en campo. Este procedimiento se replica para todas las subsecciones.

Los resultados finales del procedimiento arrojan los resultados que se resumen en la Tabla 7. Los caudales de cada subsección corresponden al producto entre la velocidad media de cada estación y su respectiva área. Finalmente el caudal total corresponde a la suma de los caudales de las subsecciones.

Tabla 7. Cálculo de subáreas y caudal total

SUBSECCIÓN	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BASE [m]	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
PROFUNDIDAD IZQUIERDA [m]	0,000	0,150	0,310	0,385	0,510	0,615	0,680	0,625	0,550	0,400	0,125
PROFUNDIDAD CENTRAL [m]	0,000	0,300	0,320	0,450	0,570	0,660	0,700	0,550	0,550	0,250	0,000
PROFUNDIDAD DERECHA [m]	0,150	0,310	0,385	0,510	0,615	0,680	0,625	0,550	0,400	0,125	0,000
ÁREA IZQUIERDA [m ²]	0,000	0,056	0,079	0,104	0,135	0,159	0,173	0,147	0,138	0,081	0,016
ÁREA DERECHA [m ²]	0,019	0,076	0,088	0,120	0,148	0,168	0,166	0,138	0,119	0,047	0,000
ÁREA TOTAL [m ²]	0,019	0,133	0,167	0,224	0,283	0,327	0,338	0,284	0,256	0,128	0,016
CAUDAL SUBSECCIÓN [m ³ /s]	0,000	0,018	0,039	0,086	0,126	0,215	0,153	0,051	0,023	0,007	0,000
CAUDAL TOTAL [m ³ /s]	0,718										

Se calcula entonces un resultado de 0,718 [m³/s] por el método de medición directa con la utilización de correntómetro.

Debe anotarse que para el día de las mediciones había transcurrido una semana de clima promedio, con días lluviosos y días soleados, en un mes de transición entre la temporada de verano a invierno, lo cual podría dar indicio de proximidad al caudal medio de la quebrada.

Finalmente, la información de profundidades de la sección desplegada en tablas se presenta gráficamente para una mejor comprensión en la Figura 27.

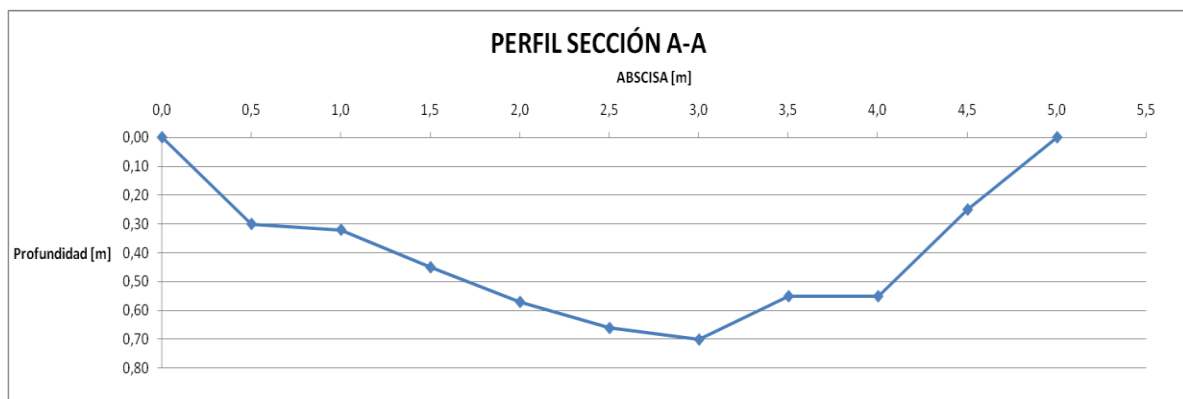


Figura 27. Perfil de la quebrada en el punto de medición

Caudal Medio Determinado Por Referencias Bibliográficas

La quebrada El Chuscal en su punto de desembocadura al río Pantanillo presenta valores de caudales resumidos en la Tabla 8:

Tabla 8. Estimación de caudales máximos y mínimos (Ángel Sanint, Mesa Sánchez, & Rubiano Ortegón, 1988)

CÓDIGO	CORRIENTE	MUNICIPIO	M. MEDIOS	V. MEDIOS	M. MAX	V. MAX	MAX. 5	MAX. 20	MAX. 100	M. MIN	V. MIN	MIN. 5	MIN. 20	MIN. 100
			[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
130	Q. Chuscal	El Retiro	0,81	0,15	10,38	3,38	12,89	16,63	20,65	0,29	0,06	0,24	0,21	0,18

Los valores mencionados pueden asumirse para el punto de estudio, pues si bien corresponden a los del punto de desembocadura de la quebrada El Chuscal en el río Pantanillo, ambos puntos distan menos de 1.000 m de distancia en los cuales no se presentan aportes adicionales significativos.

El valor medio de la quebrada El Chuscal corresponde entonces a $0,81 \text{ m}^3/\text{s}$ (Ángel Sanint, Mesa Sánchez, & Rubiano Ortégón, 1988)

Caudal Medio Determinado Por Medio De Software (HIDROSIG) Con Información Del Atlas De CORNARE

Con ayuda de la base de datos digital de Cornare y haciendo uso del software desarrollado por la Universidad Nacional (HIDROSIG), se obtuvo que el caudal medio de la cuenca de la quebrada de El Chuscal en el sitio del proyecto es de $0,687 \text{ m}^3/\text{s}$. Se destaca que la información contenida en la actualización del atlas de CORNARE de 2009, es la más acertada pues corresponde a los datos más recientes.

Caudal Ecológico

La disposición del tornillo en el sitio de obras implica la construcción de un canal de derivación del cauce principal de la quebrada. Esto con el fin de captar y recoger las aguas generadoras de potencia y a su vez retirase del cauce principal para disminuir el riesgo de inundación de los equipos de generación ante las crecientes.

Se presenta entonces un tramo del cauce principal con caudales reducidos por el caudal que se lleva al punto de generación. Dicho tramo de la quebrada debe preservarse con un caudal mínimo, correspondiente al “caudal ecológico”.

La determinación del caudal ecológico ha sido abordada por la literatura con numerosos aportes. Un método ampliamente usado corresponde a encontrar a partir de curvas de duración de caudales medios diarios, considerando el caudal que permanece en la corriente durante el 75 % del tiempo y que representa el mínimo que podría afluir por el cauce una vez se realizan las captaciones. Este caudal a su vez tiene un periodo de recurrencia de 2,33 años y es el caudal probable mínimo anual, que garantiza en alguna medida el funcionamiento de los ecosistemas (Rodríguez, 2012)

En el atlas digital de Cornare y se entiman caudales ecológicos, se tiene que el valor del caudal ecológico estimado por el método propuesto por la Universidad Nacional de Colombia (CORNARE, 2009) es el siguiente:

$Q_{\text{ecológico}} = 0,131 \text{ m}^3/\text{s}$

Caudal De Diseño

Después de determinar el caudal medio por tres métodos diferentes, directo, y a través de información secundaria se obtuvieron los siguientes valores:

$$Q_{medio \text{ por medición directa}} = 0,718 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{medio \text{ (Cornare 1989)}} = 0,810 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{medio \text{ (atlas Cornare)}} = 0,687 \frac{m^3}{s}$$

Se decide tomar un promedio entre los datos de caudal debido a su proximidad y condiciones de cálculo. Se determina entonces el siguiente valor de caudal medio:

$$Q_{medio} = \frac{Q_{medio \text{ por medición directa}} + Q_{medio \text{ (Cornare 1989)}} + Q_{medio \text{ atlas Cornare}}}{3} = 0,738 \frac{m^3}{s}$$

El caudal de diseño corresponderá entonces a la diferencia entre el caudal medio de la quebrada El Chuscal y el caudal ecológico. Su determinación se presenta a continuación:

$$Q_{diseño} = Q_{medio} - Q_{ecológico} = 0,738 \frac{m^3}{s} - 0,131 \frac{m^3}{s} = 0,607 \frac{m^3}{s}$$

Se aprecia que el caudal de diseño corresponde a un valor inferior a los 0,775 m³/s determinados a partir de la Figura 11 para un 5 % de probabilidad de excedencia. Si se remite a dicho gráfico con caudal de entrada igual al caudal de diseño de 0,607 m³/s se obtiene un 0,6 % de excedencia, un valor de alta confiabilidad.

3.4.2 Localización

Localización Geográfica

El proyecto será ubicado sobre el curso de agua de la quebrada El Chuscal. La misma quebrada en que se encuentra la caída de agua conocida como el Tequedamita. Ubicado en el oriente antioqueño, en la vía que comunica la ciudad de Medellín con la Ceja.

La entrada al lugar está ubicada a 500 m aproximadamente desde la glorieta de Don Diego. Como se puede apreciar en la Figura 28; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

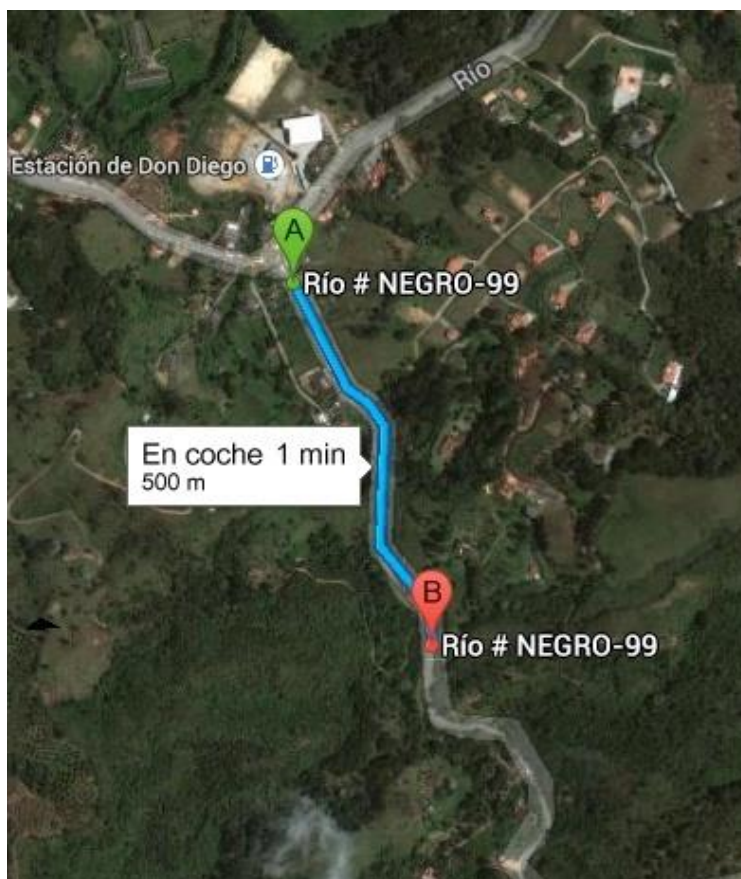


Figura 28. Ubicación proyecto quebrada El Chuscal. Google Maps

Para ser exactos, el proyecto está ubicado en las coordenadas geográficas (6°05'10,9" N, 75°28'44,4" W) WGS 1984, dichas coordenadas fueron tomadas con ayuda de un GPS de precisión. Para ver que tan cerca está el proyecto de la vía, se muestra la Figura 29:



Figura 29. Ubicación de coordenadas del proyecto. Google Earth

Localización Tornillo En Campo

Para la localización del tornillo, fue necesario realizar una altimetría con ayuda de un nivel de precisión. Dicha altimetría se le realizó en los tres lugares más importantes del proyecto de generación, para así tener una idea de la máxima cabeza de altura con la que se podrá contar. Los tres lugares considerados más importantes para el diseño de este proyecto en específico, serán: la toma del agua, la finalización de la conducción de agua (fin del canal), la superficie del curso del agua en el lugar de descarga.

A continuación, en la Tabla 9 se muestra una altimetría de los lugares antes mencionados, la cota de referencia se tomó con ayuda de un GPS.

Tabla 9. Altimetría lugar de estudio

CARTERA DE NIVEL				
LUGAR NIVEL	LUGAR PROYECTO	LECTURA	COTA	DIFERENCIA COTA
		[m]	[m. s. n. m.]	[m]
P1				
	Bocatoma	4,77	2176,83	
				0,67
	Fin canal	5,44	2176,16	
				-1,84
Punto referencia	Base puente	3,60	2178,00	
				3,99
	Fin tornillo	7,59	2174,01	

La conducción inicial, tendrá una longitud de 20,5 metros aproximadamente esta se hará en una canal rectangular de secciones B de ancho y B/2 de altura. Estas dimensiones se definen partir del caudal requerido para la generación. A lo largo de la longitud del canal que suministrará el agua al elemento de generación (tornillo), existe el paso de una vía. La solución será poner una reja o tapas en concreto reforzado para el paso de los vehículos por el sitio.

Considerando que el ángulo más eficiente del tornillo es de 22° con respecto a la horizontal, el tornillo más eficiente para este caso específico debe de tener una longitud de 5,739 m.

La disposición de las obras del proyecto en el terreno, incluidas el canal de recolección y el tornillo hidrodinámico se presenta en el anexo 2.

3.4.3 Diseño Geométrico Del Tornillo

El diseño geométrico óptimo del tornillo de Arquímedes responde a un problema de maximización pues busca encontrar la geometría que maximice la cantidad de agua que se transporta desde el extremo inferior al extremo superior en un giro (Rorres, 2000).

Incrementar la velocidad de giro correspondería a otra opción para aumentar la cantidad de agua por unidad de tiempo. No obstante esta ruta tiene un límite práctico de cuán rápido debe girar un tornillo de Arquímedes. Dicho límite corresponde a observaciones de campo y su valor máximo no debe exceder el valor dictado por la

Velocidad de rotación máxima [RPM] $= \frac{50}{D^{2/3}}$

Ecuación (3):

$$Velocidad\ de\ rotaci3n\ m3xima\ [RPM] = \frac{50}{D^{2/3}}$$

Ecuaci3n (3)

Valores superiores de velocidades de giro implican turbulencias excesivas que se traducen en fuerzas resistivas que castigan fuertemente la eficiencia hidr3ulica del equipo.

Se aprecia entonces que el par3metro de maximizaci3n enunciado anteriormente corresponde al caso de tornillos de Arqu3medes usados para el bombeo de aguas. No obstante este par3metro puede ser adoptado para el caso de tornillos para generaci3n el3ctrica.

Si se remite a la potencia que puede extraer un tornillo hidrodin3mico, esta est3 dada por la siguiente expresi3n:

$$Potencia = \eta \gamma QH$$

Ecuaci3n (4)

Puede inferirse que la altura (H) corresponde a condiciones del terreno y a la medida que el dise1ador desee aprovechar. Por otro lado el peso espec3fico del agua (γ) corresponde a un par3metro ex3geno, pr3cticamente invariable. El caudal (Q) depende del cauce de agua, su aprovechamiento podr3 hacerse con infinita variedad de dise1os geom3tricos. Esto quiere decir que el dise1o geom3trico comprender3 dos aspectos primordiales, la optimizaci3n de materiales del tornillo y la selecci3n de una geometr3a tal que repercuta en altas eficiencias hidr3ulicas (η).

El problema de optimizaci3n de material puede simplificarse a encontrar los espesores de las paredes m3nimos que garanticen la capacidad estructural suficiente ante las fuerzas que act3an sobre los elementos. No obstante este problema no se abordar3 en esta investigaci3n.

Encontrar la geometr3a 3ptima para lograr la m3xima eficiencia hidr3ulica es objetivo primordial de un dise1o de aprovechamiento hidroel3ctrico. Dicha cuesti3n fue abordada entonces por el profesor Chris Rorres y sus consideraciones ser3n expuestas a continuaci3n.

La geometr3a del tornillo estar3 gobernada entonces por dos tipos de par3metros, externos e internos.

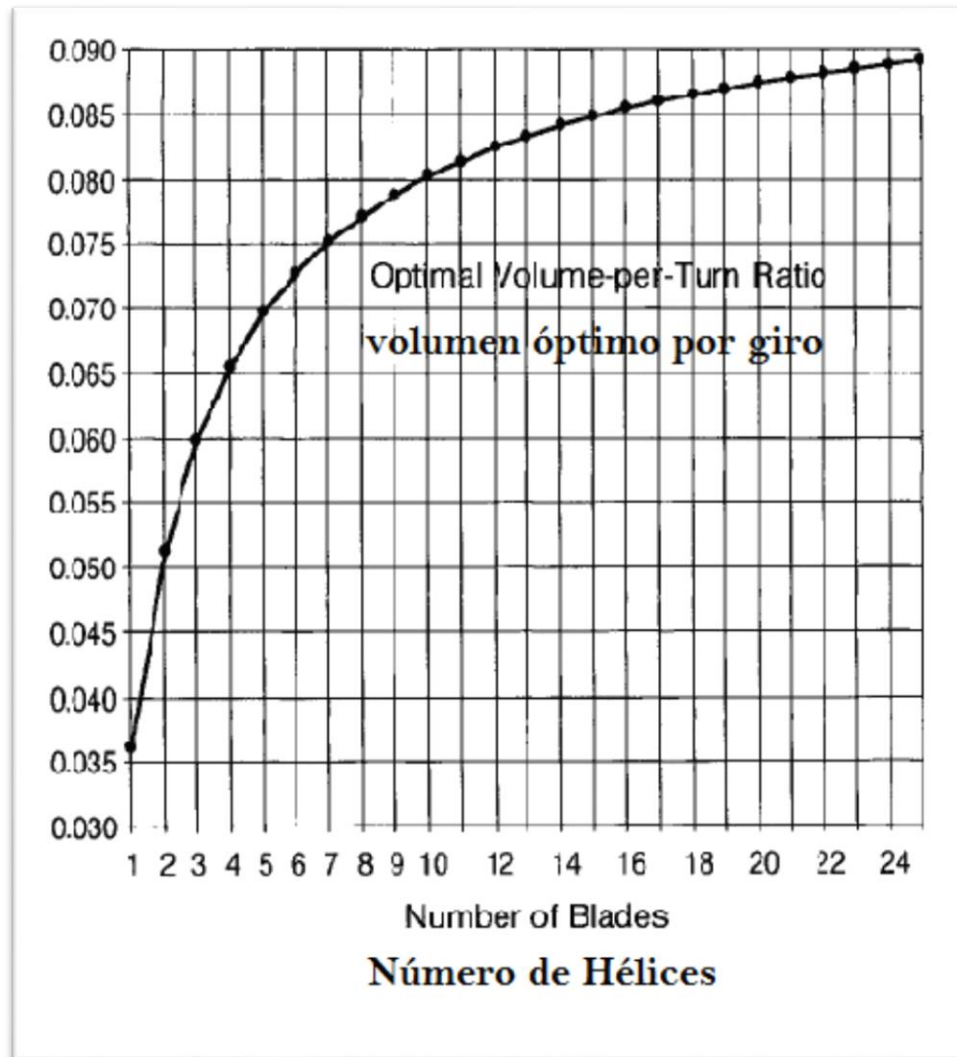
Corresponden

Por

El primer parámetro susceptible de optimización es la relación de radios (ρ), es decir $\frac{R_i}{R_o}$ Ecuación (5). El valor óptimo para dos cifras decimales corresponde a 0,54 (Rorres, 2000).

$$\rho = \frac{R_i}{R_o} \quad \text{Ecuación (5)}$$

El



Figura

La

$$\tan \beta = \frac{2\pi R_o}{L}$$

Ecuación (6). Este parámetro da cuenta de la proporción entre el periodo de las hélices y el radio externo del tornillo. Esta relación encuentra su valor óptimo equivalente a 0,2217 para un tornillo de 3 hélices.

$$\lambda = \frac{S \tan \beta}{2\pi R_o} \quad \text{Ecuación (6)}$$

La relación de volumen se determina a continuación, la cual encuentra su valor óptimo en 0,2697 para el caso de 3 hélices. Corresponde entonces al indicativo de volumen de agua respecto al volumen del tornillo.

$$v_u = \frac{V_U}{\pi R_o^2 S} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Finalmente la relación a maximizar de volumen por giro se determina mediante la

$$\lambda v_u = \frac{V_U \tan \beta}{2\pi^2 R_o^3} \quad \text{Ecuación (8)}$$

(8 Esta encuentra su valor óptimo en 0,0598 para tornillos de 3 hélices.

$$\lambda v_u = \frac{V_U \tan \beta}{2\pi^2 R_o^3} \quad \text{Ecuación (8)}$$

En la

Tabla 10 se presenta un resumen de las relaciones de las variables geométricas internas de diseño descritas. Los valores presentados corresponden a los valores óptimos de acuerdo al número de hélices.

**Tabla 10. Relaciones óptimas del tornillo de Arquímedes para varios
diferentes números de hélices. (Rorres, 2000). Editada por Mario Esteban
Madrid Wolff.**

Número de hélices	Relación de radios óptima	Relación de paso óptima	Relación de volumen por giro óptima	Relación de volumen óptima
Number of blades N (1)	Optimal radius ratio ρ^* (2)	Optimal pitch ratio λ^* (3)	Optimal volume-per-turn ratio $\lambda^*v(N, \rho^*, \lambda^*)$ (4)	Optimal volume ratio $v(N, \rho^*, \lambda^*)$ (5)
1	0.5358	0.1285	0.0361	0.2811
2	0.5369	0.1863	0.0512	0.2747
3	0.5357	0.2217	0.0598	0.2697
4	0.5353	0.2456	0.0655	0.2667
5	0.5352	0.2630	0.0696	0.2647
6	0.5353	0.2763	0.0727	0.2631
7	0.5354	0.2869	0.0752	0.2619
8	0.5354	0.2957	0.0771	0.2609
9	0.5356	0.3029	0.0788	0.2601
10	0.5356	0.3092	0.0802	0.2592
11	0.5358	0.3145	0.0813	0.2586
12	0.5360	0.3193	0.0824	0.2580
13	0.5360	0.3234	0.0833	0.2574
14	0.5360	0.3270	0.0841	0.2571
15	0.5364	0.3303	0.0848	0.2567
16	0.5362	0.3333	0.0854	0.2562
17	0.5362	0.3364	0.0860	0.2556
18	0.5368	0.3380	0.0865	0.2559
19	0.5364	0.3404	0.0870	0.2555
20	0.5365	0.3426	0.0874	0.2551
21	0.5370	0.3440	0.0878	0.2553
22	0.5365	0.3465	0.0882	0.2544
23	0.5369	0.3481	0.0885	0.2543
24	0.5367	0.3500	0.0888	0.2538
25	0.5371	0.3507	0.0891	0.2542
.
.
.
∞	0.5394	0.3953	0.0977	0.2471

En el diseño de tornillos hidrodinámicos surge el concepto de caudal de fuga entre bordes del tornillo y del canal circular que lo alberga. Se denota usualmente como Q_g . Al estar el tornillo apoyado únicamente en sus extremos, este es susceptible de deformaciones por su propio peso que inciden en variaciones de las tolerancias entre tornillo y canal. Es posible determinar analíticamente el caudal entre bordes, no obstante corresponde a un problema complejo dependiente de múltiples factores. Esta situación se ha estudiado en proyectos ejecutados y se ha determinado que el caudal entre bordes oscila entre el 2% y el 6% del caudal total que circula por el tornillo.

Se decide entonces trabajar con un valor de diseño de $Q_g = 0,04 * Q_w$.

La eficiencia de un tornillo de Arquímedes está dada por la fricción del agua con las paredes del tornillo, la fricción mecánica del eje de rotación y el caudal de fuga entre

bordes. Los dos primeros componentes de pérdida, asociados a fricciones se reducen con la reducción de la velocidad, lo que indica que el caudal entre bordes determinará la eficiencia máxima que puede esperarse.

3.4.4 Diseño Geométrico Del Tornillo (Proyecto Quebrada El Chuscal)

Siguiendo los parámetros descritos anteriormente para abordar el diseño óptimo geométrico del tornillo hidrodinámico se llega al diseño que se resume en la Tabla 11. Se trata entonces del tornillo para el caudal de diseño estipulado y las condiciones descritas propias de la quebrada El Chuscal.

Tabla 11. Diseño geométrico de tornillo (proyecto quebrada El Chuscal)

radio interno	Ri	[m]	0,348
radio externo	Ro	[m]	0,650
diámetro interno	Di	[m]	0,696
diámetro externo	Do	[m]	1,300
velocidad rotacional	n max	[rev/min]	42
relación de radios	ρ	[adim]	0,5357
inclinación tornillo	β	[°]	22
inclinación tornillo	β	[rad]	0,38
paso de las hélices	$\Lambda=S$	[m]	2,241
relación del paso de las hélices	λ	[adim]	0,2217
volumen normalizado por giro	Vu	[adim]	0,2698
relación de volumen por giro	$\lambda*Vu$	[adim]	0,0598
caudal generador de torque	Qw	[m ³ /s]	0,583
número de hélices	N	[adim]	3
desnivel	H	[m]	2,150
longitud del tornillo	L	[m]	5,739
porcentaje de caudal de fuga entre bordes	%Qg	[adim]	4%
caudal de fuga entre bordes	Qg	[m ³ /s]	0,024
caudal total	Q	[m ³ /s]	0,607

Corresponde entonces a un tronillo de magnitudes considerables, con 1,300 m de diámetro externo y una longitud de 5,739 m. De esta forma logra desarrollar el desnivel de 2,150 m con 22° de inclinación respecto a la horizontal que se tiene en el sitio. El diseño preliminar se realiza para láminas de acero de ¼ de pulgada, es decir 6,35 mm.

Un esquema en 3 dimensiones es mostrado en la Figura 31Figura 30 y permite un mejor entendimiento de la pieza, donde se aprecian en diferentes colores cada una de las 3 hélices del tornillo.

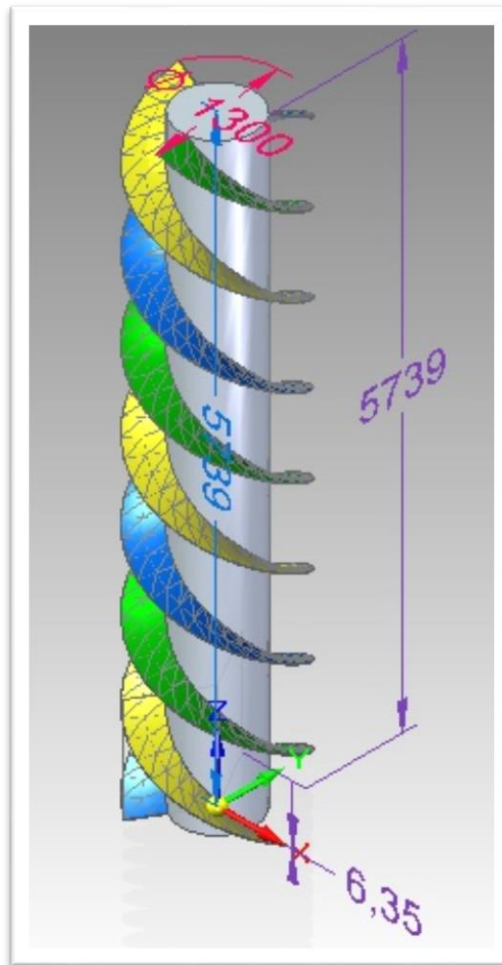


Figura 31. Esquema geométrico en 3 dimensiones (tornillo proyecto quebrada El Chuscal). Unidades en mm.

Los planos constructivos de este tornillo se presentan en anexo 1.

Los parámetros para el cálculo de potencia instalada para el tornillo hidrodinámico diseñado para el proyecto quebrada El Chuscal se presentan en la Tabla 12. El valor del desnivel correspondiente a 2,800 m proviene del desnivel $H = 2,150$ m estipulado en la Tabla 11 sumado con el valor de la altura de la lámina de agua $y = 0,650$ m plasmado en la Tabla 16. Por otro lado el valor de la eficiencia no es conocido y podrá ser determinado una vez el proyecto esté en operación; de esta manera se supone un valor de $\eta = 0,80$ para efectos de cálculo. Este valor es acorde con lo sugerido por la literatura como puede observarse en la

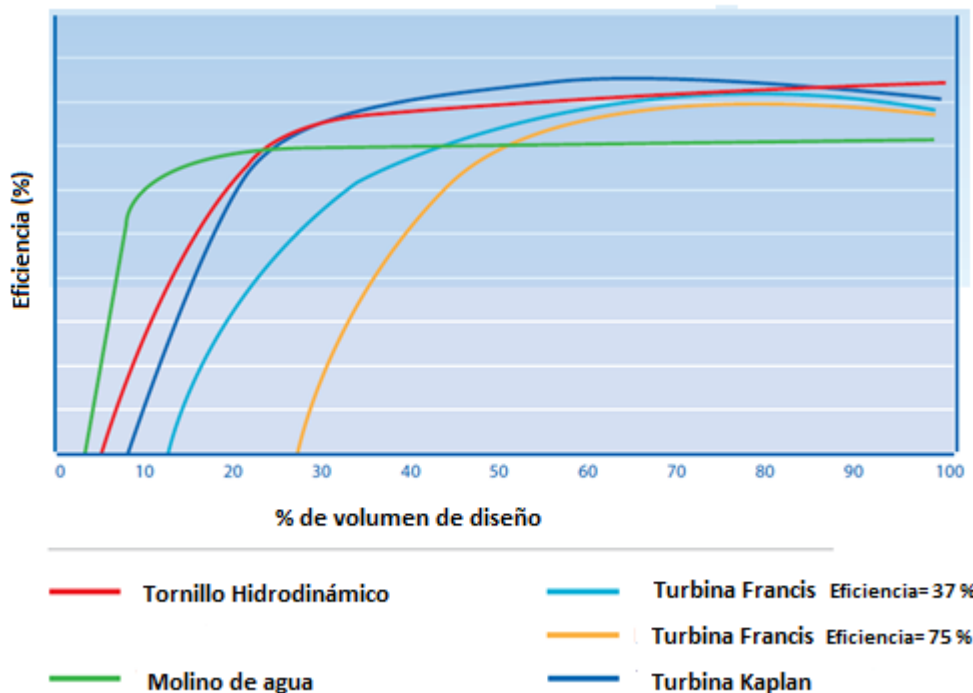


Figura 3 y la respectiva discusión realizada a su respecto. Inclusive puede decirse que es un valor de eficiencia conservador.

Tabla 12. Parámetros para el cálculo de potencia del proyecto quebrada El Chuscal.

desnivel	H_1	[m]	2,800
longitud del tornillo	L	[m]	5,739
eficiencia	η	[adim]	0,80
peso específico del agua	ρ -agua	[kN/m ³]	9,81
caudal total	Q	[m ³ /s]	0,607
potencia	P	[kW]	13,22

El proyecto tornillo hidrodinámico quebrada El Chuscal cuenta entonces con una capacidad instalada de 13,32 kW.

3.4.5 Diseño De La Estructura De Captación (Vertedero)

Se decide emplear un diseño de tomadique para la captación del caudal de generación. Debe diseñarse entonces una presa pequeña para forzar el paso del agua a través de un vertedero donde se localizará la rejilla de recolección. El

vertedero debe tener entonces las dimensiones suficientes para permitir el paso del caudal medio de la quebrada, correspondiente a los 0,738 m³/s.

Los diseños se realizan mediante la ecuación de (Sotelo Ávila, 1997) presentada a continuación:

$$Q = \frac{2}{3} * \sqrt{2 * g} E_1 * E_2 * C * L' * H^{\frac{3}{2}}$$

Ecuación (9)

Donde sus parámetros de entrada se explican a continuación:

C: coeficiente de descarga

L: longitud del vertedero

H: altura de la lámina de agua sobre el vertedero

g: gravedad

E₁: coeficiente de corrección para vertederos de cresta ancha

E₂: coeficiente de corrección para vertederos ahogados

Debido a que el caso de estudio, no cuenta con un vertedero ahogado, el factor de corrección E₂, se omitirá y tendrá un valor de 1. El factor E₁, puede calcularse así:

$$E_1 = 0,7 + \frac{0,185}{\frac{e}{H}} \quad \text{si } 0,67 < \frac{e}{h} < 3$$

Ecuación (10)

$$E_1 = 0,7 + \frac{0,1}{\frac{e}{H}} \quad \text{si } 3 < \frac{e}{h} < 10$$

Ecuación (11)

e: espesor del vertedero de cresta ancha

H: cabeza de la lámina de agua, aguas arriba del vertedero

La longitud real del vertedero debe corregirse por la presencia de contracciones laterales así:

$$L' = L - n * (0,1H)$$

L': longitud del vertedero corregida por contracciones laterales

L: longitud real del vertedero

n: número de contracciones laterales

Finalmente el factor C corresponde a una corrección para vertederos de pared gruesa así:

$$C = \left(0,6075 - \frac{(0,045 \cdot (B-L))}{B} + \frac{0,0041}{h} \right) * \left(1 + 0,55 * \frac{L^2}{B^2} * \left(\frac{h}{(h+w)^2} \right)^2 \right) \quad \text{Ecuación (12)}$$

h: lámina de agua a la entrada del vertedero, correspondiente a Y_c

B: Dimensión en planta de la quebrada en dirección perpendicular al flujo

w : profundidad desde el vertedero al fondo del cauce

El diseño del vertedero se presenta en la Tabla 13

Tabla 13; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y se aprecia que un caudal medio de 0,738 m³/s es contenido pues la capacidad del diseño es de 0,903 m³/s.

Tabla 13. Diseño de vertedero

Q requerido	FS	Q nominal	L	H	n	L'	Yc	Yn	e	e/Yn	E1	w	B	C	Q capacidad
[m ³ /s]	[adim]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[adim]	[m]	[m]	[m]	[m]	[adim]		[m]	[m]	[adim]	[m ³ /s]
0,738	1,0	0,738	2,000	0,500	2	1,8	0,258	0,387	0,9	2,33	0,78	0,5	5	0,617	0,903

Los planos de diseño se aprecian claramente en la Figura 32:

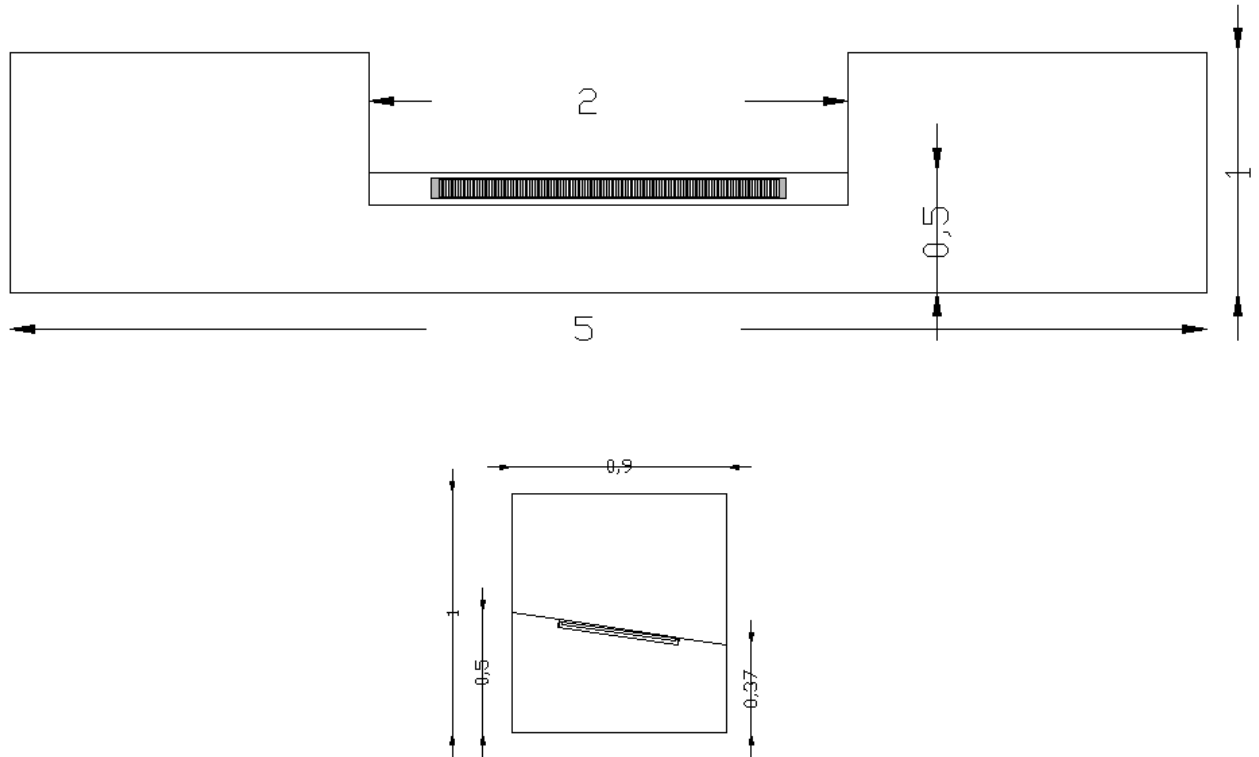


Figura 32. Frente y perfil del tomadique.

3.4.6 Diseño De La Estructura De Captación (Rejilla De Recolección)

El diseño se realiza mediante el método de Nyerges, presentado en la siguiente ecuación:

$$C1 * C2 = \frac{\frac{Q}{L_{reja}}}{\frac{V_h^3}{g} \ln \frac{B}{S_0} + \frac{g}{2V_h} (B^2 - S_0^2)}$$

Ecuación (13)

C1: porcentaje útil de captación de la rejilla

C2: Coeficiente de forma de la rejilla

g: aceleración de la gravedad

Q: caudal de diseño

V_h: Velocidad de aproximación a la rejilla, la cual se calcula así:

$$V_h = \sqrt{2 * g(H - h)}$$

Ecuación (14)

S₀: ancho de zona de aproximación

S: desprendimiento de la vena, el cual se calcula así:

$$S = Z \frac{V_h^2}{Bg}$$

Ecuación (15)

Debe verificarse que la reja trabaje sumergida, es decir $S \leq S_0$

Z: diferencia de nivel de aguas

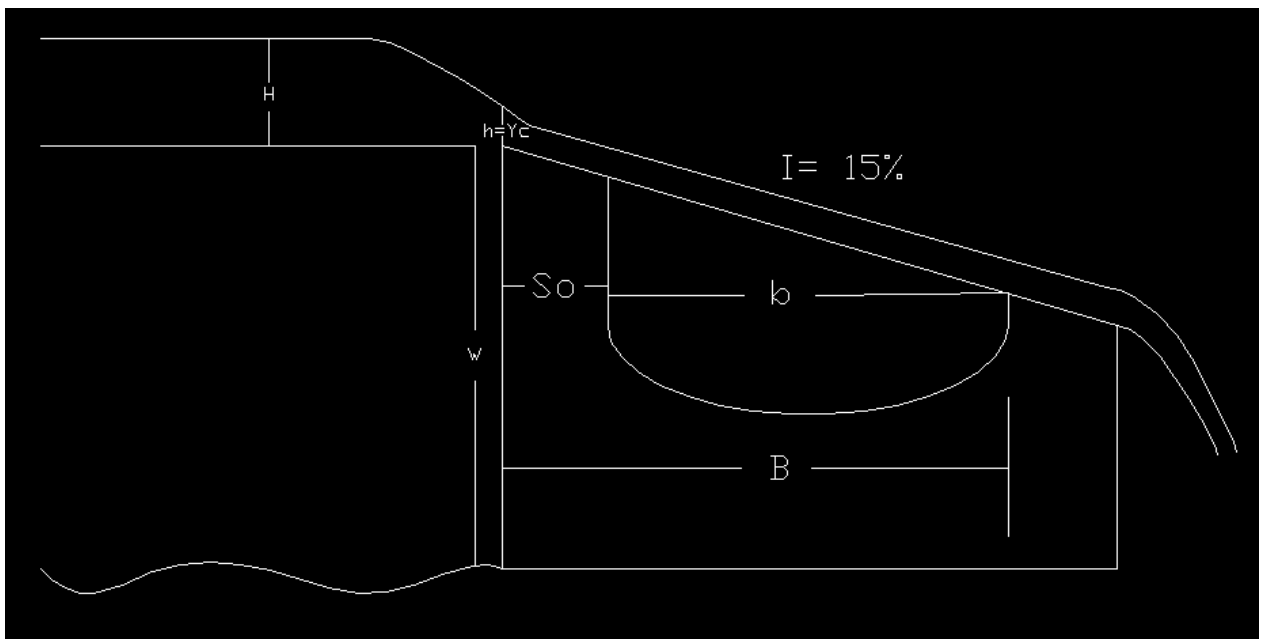
B: ancho de la reja, el cual debe calcularse así:

$$B = b + S_0$$

Ecuación (16)

Debe

Los



Figura

La

Tabla

Q requerido	FS	Q nominal	Lreja	g	B	S ₀	inclinación	teta	teta	H	h	Z	Z/B	V _h	S	C1C2
[m ³ /s]	[adim]	[m ³ /s]	[m]	[m/s ²]	[m]	[m]	[adim]	[°]	[rad]	[m]	[m]	[m]	[adim]	[m/s]	[m]	[adim]
0,607	1	0,607	1,420	9,81	0,700	0,200	0,15	8,5	0,1	0,387	0,258	0,105	1/7	1,590	0,039	0,225

Se

Tabla

TIPO	DESCRIPCIÓN	C ₂	C ₁	C ₁ *C ₂
1	Barras cuadradas de 1 cm de lado, espaciadas 1cm cada una	0,45	0,50	0,225
2	Barras cuadradas de 1 cm de lado, espaciadas cada 2 cm	0,55	0,65	0,357
3	Barras cuadradas de 1,5 cm de lado, espaciadas a 1cm	0,45	0,40	0,180
4	Barras cuadradas de 1,5 cm de lado, espaciadas a 2 cm	0,55	0,56	0,308
5	Igual tipo 1, pero con tela metálica de espesor 2 mm	0,30	0,18	0,054
6	Igual tipo 2, con tela metálica soldada	0,37	0,23	0,085
7	Igual tipo 3 ,con tela metálica soldada	0,30	0,14	0,042
8	Igual tipo 4,con tela metálica soldada	0,37	0,20	0,074

EI



Figura 3.4.7

EI

Se

$$A \cdot R h^{2/3} \cdot S^{1/2} / 2n$$

Ecuación ,

correspondiente a la ecuación de determinación de capacidad hidráulica de canales abiertos de Chezy Manning.

$$Q = \frac{A \cdot R h^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n}$$

Ecuación (17)

Donde:

Q: caudal [m^3/s]

A: área mojada [m^2]

R_h : radio hidráulico

S_0 : pendiente del canal [adim]

n: coeficiente de rugosidad de Manning [$\text{s} \cdot \text{m}^{-1/3}$]

Se decide que el ancho del canal de suministro coincida con el diámetro externo del tornillo permitiendo así que no se presenten reducciones en planta. De esta manera queda definida también la profundidad del canal respondiendo a la sección óptima de canales abiertos, con ancho igual al doble de la altura. Por otro lado la rugosidad del canal está definida por la selección del material de construcción, correspondiente a un valor de $n=0,015$ para concreto. Finalmente se realiza un proceso sucesivo de variación de la pendiente hasta encontrar el valor suficiente para transportar el caudal de diseño. En la Tabla 16 se presenta entonces un resumen de los parámetros de diseño del canal de suministro y se aprecia que tiene una capacidad suficiente para transportar los $0,607 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 16. Diseño del canal de suministro.

profundidad del agua	y	[m]	0,650
ancho del canal	b	[m]	1,300
Radio hidráulico canal rectangular	R_h	[m]	0,325
pendiente del canal	S_0	[adim]	0,052%
n de Manning	n	[$\text{s} \cdot \text{m}^{-1/3}$]	0,015
velocidad normal	V_n	[m/s]	0,70
área del canal	A	[m^2]	0,85
caudal	Q	[m^3/s]	0,607

Debe verificarse que la velocidad del agua en el canal sea suficiente para evitar la sedimentación de sólidos suspendidos. La Tabla 17. Velocidad se sedimentación a 10°C (Escuela de Ingeniería de Antioquia) indica los valores de velocidad de sedimentación para 10°C que corresponden a la temperatura del líquido promedio en la zona del proyecto. Se aprecia que para arenas la velocidad de sedimentación

corresponde a 0,8 cm/s, partícula que puede asumirse como crítica para un análisis tentativo.

Tabla 17. Velocidad se sedimentación a 10 ° C (Escuela de Ingeniería de Antioquia)

<i>Relación del diámetro de la partícula y la velocidad de sedimentación a 10°C</i>					
<i>Material</i>	<i>Diámetro</i>	<i>Reynolds</i>	<i>v_s (cm/s)</i>	<i>Régimen</i>	<i>Ley aplicada</i>
Arena fina	0.1	0.8	0.8	Laminar	Stokes
Arena gruesa	0.15	2	15	Transición	Hagen
Grava		>10000	100	Turbulento	Newton

Posteriormente se remite el análisis encontrar la velocidad de no sedimentación de un canal (v_{ns}) según la ecuación empírica de I.I. Levy enunciada a continuación:

$$v_{ns} = 0,01 \frac{w}{\sqrt{d_{ks}}} \sqrt{R} \left(\frac{0,0225}{n} \right) \quad \text{Ecuación (18)}$$

Donde:

w: Velocidad de sedimentación de una partícula de cierto diámetro en [mm/s]

d_{ks} : diámetro característico de las partículas en suspensión en [mm]

R: radio hidráulico del canal en [m]

n: coeficiente de rugosidad del canal

Remplazando los valores se obtiene:

$$v_{ns} = 0,01 \frac{8}{\sqrt{0,1}} \sqrt{0,325} \left(\frac{0,0225}{0,015} \right) = 0,216 \text{ m/s}$$

Se aprecia entonces que la velocidad en el canal de 0,7 m/s registrada en la Tabla 16 es superior a la velocidad de no sedimentación de 0,216 m/s lo que indica un diseño apropiado.

3.4.8 Diseño Estructural Del Canal De Recolección

El canal de suministro corresponde a una estructura enterrada, justo para quedar a raz del terreno. El diseño hidráulico indicó las dimensiones internas de este canal, ahora se procede entonces a calcular el acero necesario para un espesor de muros de 10 cm.

Los elementos verticales del canal, es decir sus paredes, estarán sometidas al empuje hidrostático del agua que fluye y el empuje lateral de tierras, lo que indicaría una actuación en direcciones contrarias que disminuirían el empuje total. No obstante se decide diseñar este canal despreciando la acción de contrarresto del empuje de tierras, siendo esta una condición más crítica y que podría presentarse en la situación de pérdida de material de suelo en los laterales por acciones externas.

El diseño de la losa de fondo corresponde a una situación de menor exigencia estructural puesto que tiene garantizado un apoyo continuo por el suelo. Se decide entonces realizar el diseño para las paredes y adoptarlo igualmente para la losa de fondo del canal. Debe decirse que para la losa debe realizarse un estudio juicioso de la resistencia suficiente del terreno para atender la solicitud por carga de los elementos y carga del agua, sin embargo está por fuera del alcance de este trabajo.

El diseño corresponde entonces al caso de flexión en un voladizo con una carga distribuida correspondiente a la presión hidrostática. Su cálculo se presenta a continuación en la Tabla 18 y se realiza por metro en el sentido de avance del agua en el canal. La cuantía necesaria corresponde a un valor inferior de la cuantía mínima estipulada por la NSR-10, de esta manera decide suministrarse esta última.

Tabla 18. Diseño estructural del canal de suministro.

h	profundidad	[m]	0,650
γ	peso específico del agua	[N/m ³]	9800
P	presión en el fondo	[N/m ²]	6370
F	fuerza hidrostática	[N/m]	2070
a	altura de aplicación	[m]	0,217
M	momento flector	[Nm/m]	449

f'c	resistencia del concreto	[Mpa]	21
fy	resistencia del acero	[Mpa]	420
b	ancho de elemento	[m]	1,000
d	distancia de fibra superior a barras	[m]	0,050
ρ	cuantía	[adim]	0,00273
As	área de acero	[mm ²]	136,5
D	barra #	[adim]	3
	cantidad de barras	[adim]	2
	Espaciamiento entre barras	[m]	0,500

La profundidad de diseño del canal corresponde a 65 cm, no obstante se decide suministrar una altura de 10 cm adicionales, de borde libre, ante posibles eventualidades donde se presenten ingresos superiores de caudales no previstos. Se decide construir muros y fondo de 10 cm de espesor y posicionar las barras de acero en el medio de dicha distancia. A continuación en la Figura 35 se presenta el plano constructivo del canal.

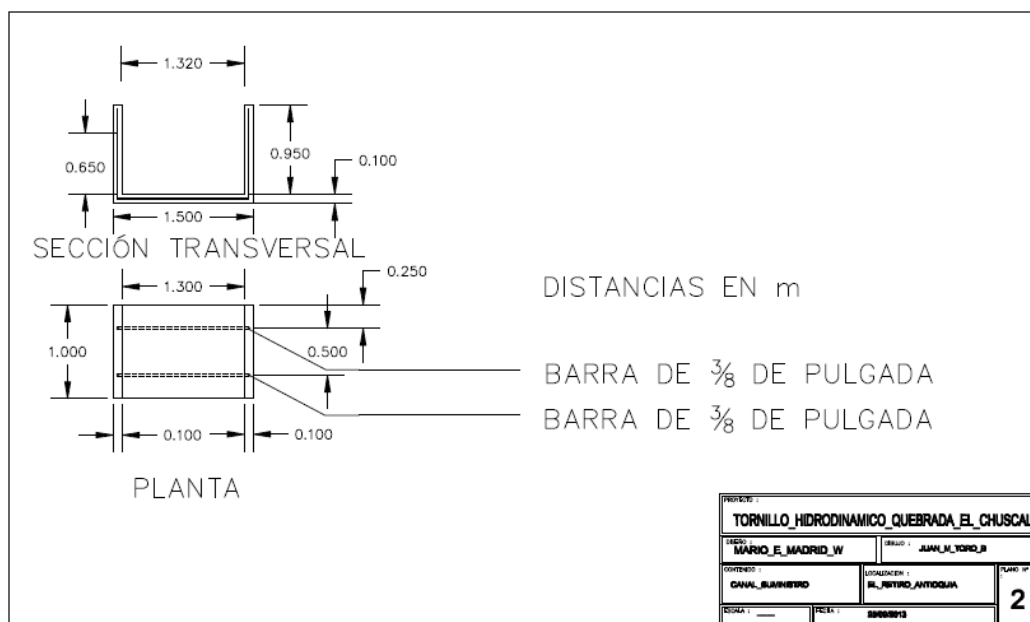


Figura 35. Plano constructivo del canal de suministro.

3.5 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

La energía generada en el proyecto quebrada El Chuscal debe ser llevada hasta el lugar donde se realiza la venta de energía al sistema interconectado nacional.

Este caso particular corresponde a una subestación de energía que pertenece a Empresas Públicas De Medellín (EPM). Ubicada en el oriente antioqueño, en la vía que comunica Medellín con el aeropuerto a 300 m aproximadamente desde la glorieta conocida comúnmente como “Sancho Paisa”, En el municipio de Envigado.

La distancia entre el proyecto de generación y la subestación mencionada es de aproximadamente 13,8 km. Las líneas de transmisión deben ser llevadas por vías públicas, siguiendo el lineamiento de la carretera trazada entre las glorietas de “Sancho Paisa” y “Don Diego”. Pues si pasaran las líneas de transmisión por predios ajenos, se tendrían que negociar derechos de servidumbre.

En la Figura 36 se presenta el curso a seguir de las líneas de transmisión entre la subestación y el proyecto de generación.

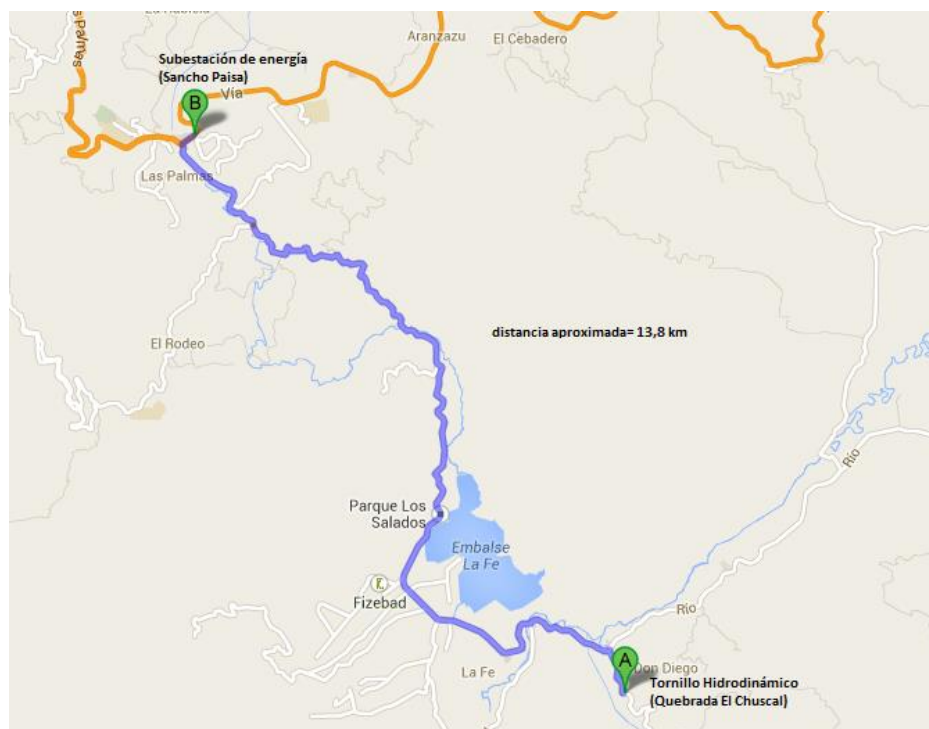


Figura 36. Distribución de líneas de transmisión (Google Maps)

3.6 ANÁLISIS ECONÓMICO

Promedio Ponderado del Costo de capital (WACC).

El WACC (*Weighted Average Cost of Capital*) o su traducción al español de *promedio ponderado del costo de capital*, hace referencia a la “tasa de descuento que suele emplearse para descontar los flujos de fondos operativos para valorar

una empresa utilizando el descuento de flujos de efectivo, en el 'Enterprise approach' (enfoque empresarial)" (Enciclopedia Financiera).

Corresponde al factor más importante en la evaluación financiera de proyectos pues de este depende la viabilidad económica y además de indicar la viabilidad, da una idea de lo atractivo que puede ser la inversión.

Para el cálculo del WACC debe emplearse la ecuación que se presenta a continuación.

$$ck = \% D * K_D * (1 - T \%) + \% E * K_E$$

K_D : costo de deuda

K_E : costo de patrimonio

T %: tasa de impuestos a la renta

% D: porcentaje de endeudamiento (en inversión inicial)

% E: porcentaje de participación de socios (en inversión inicial)

Debe tenerse en cuenta que la suma del endeudamiento y lo aportado por los socios suma el valor total de la inversión del proyecto y esta situación se describe por medio de la siguiente ecuación:

$$\%D + \%E = 100 \%$$

Además los valores del porcentaje de endeudamiento y de retorno esperado por los socios deben calcularse respectivamente con las ecuaciones que se describen a continuación:

$$\%D = \frac{D}{D + E}$$

$$\%E = \frac{E}{D + E}$$

D: capital aportado al proyecto por medio de préstamos

E: capital aportado al proyecto por los socios

Para el cálculo del costo de patrimonio se hará referencia a valores en dólares con empresas del sector energético de Estados Unidos y luego se realizará la debida

conversión para que los valores hallados sean los adecuados para un proyecto del sector energético colombiano. Para esto se hace uso de la siguiente ecuación:

$$K_{E\text{ nominal } (\$ US)} = R_F + \beta_L(R_M + R_F) + \text{Riesgo país} + \text{prima por tamaño}$$

R_F : tasa libre de riesgo

R_M : rentabilidad del mercado

β_L : correlación de la gráfica R_F Vs. R_M

Para el cálculo del factor β_L es indispensable el uso de la ecuación que hace referencia al riesgo puro del sector y se presenta a continuación:

$$\beta_L = \beta_u * \left[1 + (1 - T\%) * \frac{\%D}{\%E} \right]$$

β_u : beta desapalancado (riesgo puro del sector)

Para los cálculos de los valores β_u (riesgo puro del sector) y la relación entre los porcentajes de inversión con capital en calidad de préstamo y capital de socios, tasa libre de riesgo y rentabilidad del mercado, se tendrán en cuenta los valores calculados por el autor Aswath Damodaran.

Los valores correspondientes a la tasa libre de riesgo (R_f) y la rentabilidad del mercado (R_M), se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19. Retornos anuales de inversión. (Damodaran)

Promedio geométrico	S&P 500	Bonos de tesoro 10 años
Años a promediar	Rentabilidad del mercado	Tasa libre de riesgo
1928-2012	9,31%	5,11%

Para los valores de la relación $\%D/\%E$ y β_u es indispensable conocer valores de muchas empresas del sector para así poder determinar un valor adecuado, debido a que en Colombia son muy pocas las empresas que transan en bolsa diariamente es imposible tener datos de empresas de Colombia, por esto se recurre a la información de la bolsa Estadounidense y luego se recurre a relacionar esta

información con la colombiana. Ya que en Estados Unidos la distribución de energía se distribuye por tres sectores (centro, este y oeste), se tomará un valor medio entre los tres y se presenta en la Tabla 20 a continuación:

Tabla 20. Valor medio compañías E.E.U.U. (Damodaran)

Tipo de compañía	Número de compañías	%D/%E	β_u
sector eléctrico (centro)	20	85,00%	0,36
sector eléctrico (este)	17	67,90%	0,29
sector eléctrico (oeste)	15	81,37%	0,37
PROMEDIO	52	78,09%	0,34

El “Riesgo país” también conocido como EMBI por sus siglas en ingles (Emerging markets bond index) hace referencia al riesgo que un inversionista sufre al invertir en cierto país. Para este trabajo se utilizarán los cálculos de riesgo país realizados por JP Morgan.

Este factor es calculado diariamente, por lo que es necesario recurrir a una serie de datos del comportamiento de los últimos años de la economía. La información utilizada para el cálculo del “Riego país” corresponde a los datos desde el 1 de enero del año 2011 en Colombia, debe aclararse que la forma de calificación es en puntos y que 100 puntos son equivalentes a 1 en porcentaje (100 puntos = 1 %).

En la

Figura 37, puede apreciarse de forma clara la variación del riesgo país de los últimos años, además puede concluirse acerca de Colombia, que es un país interesante para nuevos inversionistas, ya que el riego país es relativamente bajo.

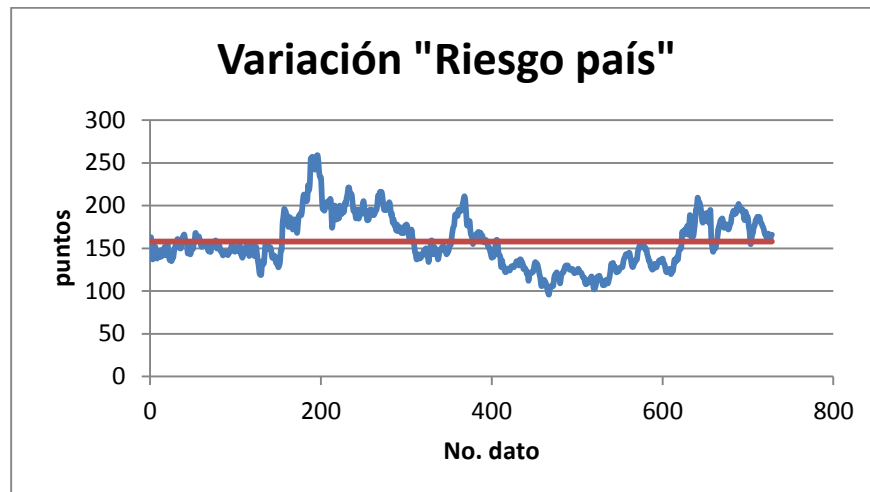


Figura 37. Riesgo país (Ámbito)

Se tiene entonces un riesgo país de 158 puntos, es decir:

Riesgo país= 1,58 %

Por asesoría de la docente Isabel Cristina Ortiz, profesora del curso Formulación y Evaluación de Proyectos de la Escuela De Ingeniería De Antioquia se optó por manejar una prima por tamaño entre el 10 % y el 12 %, esto debido a que el proyecto es de emprendimiento por una empresa no reconocida del mercado.

Se trabajó entonces con un valor de 11 % en el factor prima por tamaño.

Luego de desarrollar los pasos antes mencionados y calcular todos los valores requeridos para la solución de la ecuación de $K_{E \text{ nominal } (\$ \text{ eu})}$, se debe convertir este resultado a un valor adecuado para el trabajo en Colombia, ya que este fue calculado exclusivamente con datos de Estados Unidos de América, para tal fin se usa la ecuación que se muestra a continuación:

$$K_{E \text{ nominal } (\$ \text{ cop})} = (1 + K_{E \text{ nominal } (\$ \text{ us})}) * (1 + DDPC) - 1$$

DDPC: devaluación de paridad cambiaria

La devaluación de paridad cambiaria hace alusión a la pérdida de la capacidad de compra de una moneda (pesos colombianos en este caso) frente a otra moneda (dólares americanos en este caso). Esta devaluación que sufre el peso colombiano frente al dólar americano puede calcularse de la siguiente manera:

$$DDPC = \frac{(1 + \text{proy inflación Colombia})}{(1 + \text{proy inflación E.E.U.U.})} - 1$$

Al desarrollar todo el procedimiento descrito anteriormente se llega finalmente al valor promedio ponderado del costo de capital o WACC, este es el valor que se utilizará para llevar las proyecciones de ventas de años futuros al presente. Una vez obtenido el valor presente neto, se dará una respuesta a la viabilidad del proyecto.

A continuación en la

Tabla 21 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de los cálculos mencionados:

Tabla 21. Promedio ponderado del costo de capital (WACC)

T %	33%
RF	5%
RM	9%
β_u	0,34
β_l	0,518
RIESGO PAÍS (EMBI)	2%
PRIMA POR TAMAÑO	11%
%D/%E	78%
E	\$ 37.493.650,96
D	\$ 29.278.792,04
% D	43,85%

% E	56,15%
KD	12%
KE (\$ E.E.U.U.)	25%
DDPC	0,98%
proyección inflación E.E.U.U.	2,4%
KE (\$ COP)	26,38%
CK (WACC)	18,34%

Aunque el WACC propuesto por la comisionista de bolsa SERFINCO para proyectos energéticos es del 9,37 %, este valor solo puede ser contemplado para empresas reconocidas del mercados en el sector energético, como los son ISAGEN y EPM entre otros ya que el valor de prima por tamaño, que considera una empresa de esta embergadura es un porcentaje pequeño. Además las tasas de préstamos que pueden obtener compañías de este tamaño, son mucho más bajas que las que puede conseguir una compañía no reconocida en el mercado, es por esto que un proyecto de este tipo puede llegar a ser atractivo para estas empresas, pero difícilmente es atractivo para un nuevo inversionista.

Debido a que el proyecto se considerará para una empresa innovadora y nueva en el mercado, se tomará el valor calculado del WACC.

Inversión Inicial

Para obtener el valor total de la inversión inicial requerida, es necesario requerir a un análisis de precios unitarios, en los cuales se contemplan los ítems siguientes:

1) Movimiento De Tierras: dentro del ítem de movimiento de tierras se contemplan los siguientes factores:

- Desmonte Y Limpieza De Zonas De Trabajo: Este hace alusión a la limpieza del terreno y el descapote del mismo para poder iniciar las labores de excavación y poder reutilizar el material sobrante. Se valora en un total de \$ 452.000, para su ejecución.
- Movimiento De Tierras, Excavación En Material Común, Incluye Retiro De Posibles Rocas Existentes: este factor contempla las excavación requeridas

para la localización del canal de suministro y la casa de maquinas. Se valora en un total de \$ 1.102.992 para su ejecución.

- Conformación Del Terraplén (Llenos), Con Material Seleccionado Proveniente de Las Excavaciones, Incluye Compactación: en este ítem se tienen en cuentas la conformación del terraplén requerido para la construcción del canal del tornillo hidrodinámico, desde la casa de máquinas hasta la zona de descarga de agua. Se valora en un total de \$ 928.000 para su ejecución.

El monto total del ítem de movimiento de tierras asciende a un total de \$ 2.482.992

2) Construcción: el ítem de construcción se conforma de los factores que se nombran a continuación:

- Concreto $f'c = 21$ MPa: este factor de construcción contempla todas las obras de civiles requeridas para la ejecución del proyecto de construcción de la obra de generación eléctrica. Se valora en un total de \$ 3.428.951 para su ejecución.
- Acero de Refuerzo Corrugado, Diámetro (3/8) de pulgada, $f_y = 420$ MPa: el acero de refuerzo es el complemento del concreto para soportar las posibles cargas existentes en el canal de suministro, la losa de la casa de maquinas y la estructura de contención y captación (toma-dique). Se valora en un total de \$ 378.000 para su ejecución.
- Construcción Casa De Máquinas: en este factor del ítem construcción se contempla la construcción de la casa de maquinas, incluyendo techo en tejas plásticas, puerta de acero y mampostería. Se valora en un total de \$ 2.000.000 para su ejecución.

El monto total del ítem de construcción asciende a un total de \$ 5.806.951

3) Implementos De Generación Y Suministro A Subestación De Energía: este es el ítem más importante en la evaluación financiera del proyecto, pues la inversión más cuantiosa corresponde a este. Dentro de este ítem se contemplan los siguientes factores:

- Tornillo Hidrodinámico: existen pocas empresas en el mundo que se dedican a la fabricación de este implemento generador y ninguna de ellas es colombiana, por lo que fue necesario enviar el diseño del tornillo a la empresa Doblamos S.A. y que ellos realizaran una cotización, además dentro del ítem se contempla el transporte y la instalación de este. Se valora en un total de \$ 15.500.000 para su ejecución.

- Generador de electricidad: el generador es una de las partes más importantes del proyecto, puesto que sin este el proyecto no tendría ningún sentido, no generaría electricidad. Debido a que el generador debe tener una capacidad pequeña (15 kW) fue imposible conseguir el precio de este en Colombia. Se recurrió a precios en China, así que dentro de este se contemplan los factores: generador, importación del generador, transporte e instalación. Se valora en un total de \$ 14.702.500 para su consecución.
- Líneas De Transmisión, incluyendo Tranformador, Postes De Elevación Y Cables De Alta Tensión: depende del valor de este ítem si el proyecto es viable o no, pues corresponde a gran porcentaje de la inversión, por esto es gran determinante del proyecto su localización y su cercanía a una subestación de energía. Se valora en un total de \$ 759.000.000 para su ejecución.

El monto total de implementos de generación y suministro a subestación de energía asciende a \$ 789.202.500

- 4) Transporte De Maquinaria: en este ítem se contempla el transporte de la maquinaria requerida para la construcción del proyecto, se consideró el transporte de un retrocargador y un vibrocompactador desde Itagüí. Se cuenta con un total de \$ 1.920.000 para el desarrollo de este ítem.

Adicional a los costos indicados anteriormente se debe tener en cuenta la mano de obra, para la mano de obra se cuenta con un presupuesto de \$ 3.680.000.

A continuación en la Tabla 22 se presenta el resumen del análisis de precios unitarios del proyecto.

Tabla 22. Resumen análisis de precios unitarios

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRESUPUESTO	mano de obra
1	MOVIMIENTO DE TIERRAS				
1.1	Desmante y Limpieza de zonas de trabajo	m2	96	\$ 452.000	\$ 3.680.000,00
1.2	Movimiento de tierra, excavación en material común, incluye retiro de posibles rocas existentes	m3	31,57875	\$ 1.102.992	
1.3	conformación de terraplén (llenos), con material seleccionado proveniente de las excavaciones, incluye compactación	m3	21,7	\$ 928.000	
2	CONSTRUCCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRESUPUESTO	
2.1	Concreto hidráulico F'c = 21 MPa	m3	6,817	\$ 3.428.951	
2.2	Acero de refuerzo corrugado, diámetro 3/8 de pulgada, fy = 420 Mpa	UND	20	\$ 378.000	
2.3	construcción casa de maquinas	UND	1	\$ 2.000.000	
3	IMPLEMENTOS DE GENERACIÓN Y SUMINISTRO A SUBESTACIÓN DE ENERGÍA				
3.1	Tornillo hidrodinámico	UND	1	\$ 15.500.000	
3.2	Generador de electricidad	UND	1	\$ 14.702.500	
3.3	lineas de transmisión, incluye: transformador, postes de elevación y cables de alta tensión	KM	13,8	\$ 759.000.000	
4	TRANSPORTE DE MAQUINARIA	KM	64	\$ 1.920.000,00	
TOTAL				\$	803.092.443

Evaluación financiera

El objetivo de este capítulo corresponde a definir si la inversión realizada en el proyecto de generación hidroeléctrica quebrada El Chuscal es económicamente viable. Para ello se aplica el concepto de flujos de caja traídos a valor presente de 2013 y definir que los ingresos sean superiores a los egresos durante la vida útil del proyecto.

Para el cálculo del WACC se contempló una relación de la inversión realizada por medio de un préstamo y por financiamiento de socios, esta relación se desea mantener, es por esto que el proyecto será financiado de la manera que se presenta en la Tabla 23.

Tabla 23. Financiamiento de inversión inicial

PRÉSTAMO	\$	352.144.920,40
CAPITAL SOCIOS	\$	450.947.522,60
TOTAL	\$	803.092.443,00

El préstamo que puede ofrecer un banco para un proyecto de innovación y teniendo en cuenta que tiene la seguridad del sector eléctrico colombiano es al menos 12 % efectivo anual, se consideró un préstamo a 9 años. La información y amortización de la deuda se presenta en la Tabla 24.

Tabla 24. Amortización de crédito bancario

préstamo	i % (efectivo anual)	períodos de pago
\$ 352.144.920,40	12%	9

périodo	abono a capital	saldo	interés
0		\$ 352.144.920,40	
1	\$ 39.127.213,38	\$ 313.017.707,02	\$ 42.257.390,45
2	\$ 39.127.213,38	\$ 273.890.493,64	\$ 37.562.124,84
3	\$ 39.127.213,38	\$ 234.763.280,27	\$ 32.866.859,24
4	\$ 39.127.213,38	\$ 195.636.066,89	\$ 28.171.593,63
5	\$ 39.127.213,38	\$ 156.508.853,51	\$ 23.476.328,03
6	\$ 39.127.213,38	\$ 117.381.640,13	\$ 18.781.062,42
7	\$ 39.127.213,38	\$ 78.254.426,76	\$ 14.085.796,82
8	\$ 39.127.213,38	\$ 39.127.213,38	\$ 9.390.531,21
9	\$ 39.127.213,38	\$ (0,00)	\$ 4.695.265,61

La tarifa de venta de la energía será una variable económica de fundamental interés para el análisis de este proyecto, pues determinará las magnitudes de los flujos entrantes de dinero.

Las tarifas de compra de electricidad a productores la define la acción de mercado de la bolsa energética colombiana, operada por la empresa XM (Expertos en Mercado). En la Tabla 25 se presenta un resumen de la variación de las tarifas de transacción entre productores y consumidores.

Tabla 25. Variación del precio de electricidad en bolsa

PERÍODO	Precio Promedio Bolsa Energía Eléctrica [\$/kW*h]
2012-01-31	54,22
2012-02-29	78,48
2012-03-31	119,82
2012-04-30	57,5
2012-05-31	47,02
2012-06-30	87,4
2012-07-31	78,6
2012-08-31	139,31
2012-09-30	183,63
2012-10-31	200,21
2012-11-30	166,34
2012-12-31	181,39
2013-01-31	185,01
2013-02-28	182,18
2013-03-31	137,72
2013-04-30	234,25
2013-05-31	139,08
2013-06-30	141,3
2013-07-31	236,47
2013-08-31	151,87

Adicionalmente se presenta la gráfica asociada a estos valores en la Figura 38, donde se hace más visible la variación. El eje de abscisas corresponde a unidades de periodos en meses, comprendidos desde enero de 2012 hasta agosto de 2013.

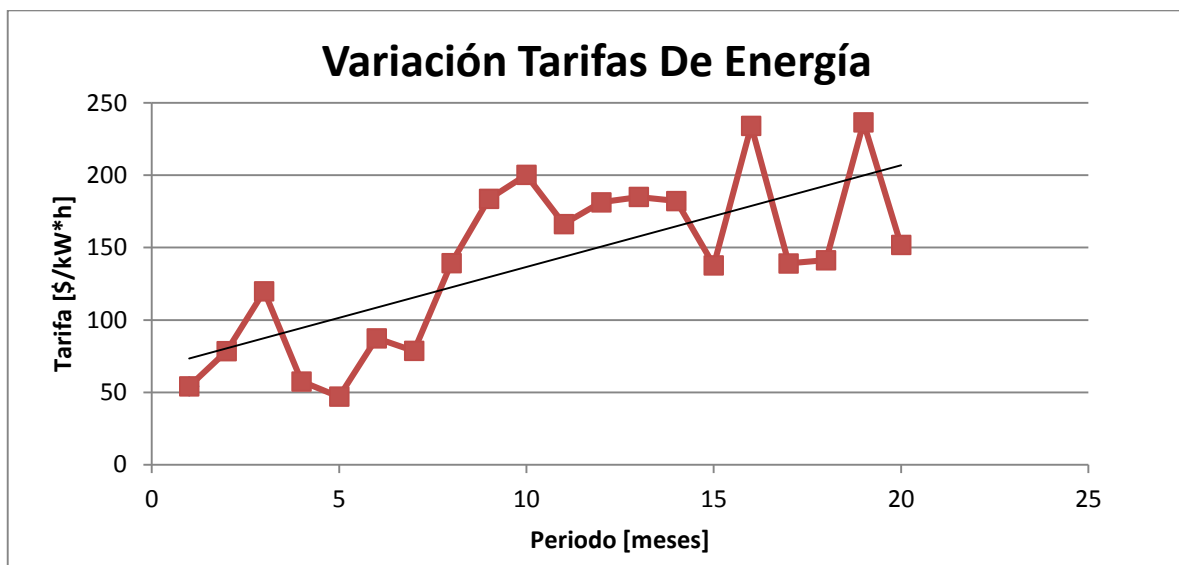


Figura 38. Evolución del precio de la energía

La variación de las tarifas responde principalmente a las condiciones climáticas, es decir que para periodos de verano se incrementan los precios y en periodos de invierno disminuyen. Si bien las variaciones son fuertes, se observa que se compensan los valores bajos con los valores altos, de esta manera se decide entonces trabajar con el valor promedio registrado para los 20 meses registrados. Dicho valor corresponde a 140 \$/kW*h.

Teniendo el promedio de venta de electricidad de los últimos años, se procede a realizar la evaluación financiera del proyecto. Para esto es necesario recurrir al desarrollo de un balance general del proyecto, con valores supuestos de ventas de energía anual. Para realizar las proyecciones del aumento del precio de la energía en 30 años de evaluación del proyecto se realizó la proyección del IPC en Colombia y se obtuvo que la inflación a considerar debe ser de 3,4 %. En la Tabla 26, se puede apreciar la variación del precio para los treinta años de evaluación financiera, además se aprecia la proyección de ventas diarias al sistema interconectado.

Tabla 26. Proyección de ventas diarias y aumento del precio generación de electricidad

Etapas de vida del proyecto	Cantidad diaria energía generada diaria	Precio de venta	Valor venta diaria
[años]	[KW/h]	[\$*KW/h]	[\$]
0	340,8	140	\$ 47.712,00
1	340,8	144,76	\$ 49.334,21
2	340,8	149,68	\$ 51.011,57
3	340,8	154,77	\$ 52.745,96
4	340,8	160,03	\$ 54.539,33
5	340,8	165,47	\$ 56.393,66
6	340,8	171,10	\$ 58.311,05
7	340,8	176,92	\$ 60.293,62
8	340,8	182,93	\$ 62.343,61
9	340,8	189,15	\$ 64.463,29
10	340,8	195,58	\$ 66.655,04
11	340,8	202,23	\$ 68.921,31
12	340,8	209,11	\$ 71.264,64
13	340,8	216,22	\$ 73.687,64
14	340,8	223,57	\$ 76.193,02
15	340,8	231,17	\$ 78.783,58
16	340,8	239,03	\$ 81.462,22
17	340,8	247,16	\$ 84.231,94
18	340,8	255,56	\$ 87.095,82
19	340,8	264,25	\$ 90.057,08
20	340,8	273,24	\$ 93.119,02
21	340,8	282,53	\$ 96.285,07
22	340,8	292,13	\$ 99.558,76
23	340,8	302,07	\$ 102.943,76
24	340,8	312,34	\$ 106.443,84
25	340,8	322,95	\$ 110.062,94
26	340,8	333,94	\$ 113.805,08
27	340,8	345,29	\$ 117.674,45
28	340,8	357,03	\$ 121.675,38
29	340,8	369,17	\$ 125.812,34
30	340,8	381,72	\$ 130.089,96

Tomando como valores conocidos la proyección de venta diaria de energía al sistema interconectado nacional (SIN) se procede entonces a realizar el balance general, teniendo en cuenta los factores de descuento del precio de venta total.

Entre estos factores están los impuestos, dichos impuestos tienen un beneficio tributario según el artículo 13 del proyecto de ley de energías no convencionales, el

beneficio es el descuento del 50 % del valor de los impuestos por los primeros 5 años de vida del proyecto.

Además como parte del capital invertido proviene de un préstamo, se tiene otro beneficio tributario y este se refiere al descuento del 33 % de los intereses.

Debe tenerse en cuenta también la depreciación de los bienes materiales con que cuenta la planta generadora, entre estos bienes están: líneas de transmisión, generador y tornillo hidrodinámico. El valor de descuento de la depreciación es un valor de reserva para el momento en que haya que cambiar los implementos de generación. Aunque la depreciación se realizó a treinta años, los generadores con un buen mantenimiento pueden prestar más tiempo de servicio, al igual que el tornillo hidrodinámico.

También es de vital importancia guardar una reserva anual para costos de mantenimiento para alargar la vida útil de los implementos de generación, así como tener en cuenta el sueldo de la persona encargada de la limpieza y el mantenimiento semanal.

Teniendo en cuenta los descuentos y beneficios tributarios antes mencionados y considerando todos los descuentos que se deben considerar en un análisis financiero se construye el balance general del proyecto a 30 años y se obtiene lo presentado en la Tabla 27.

Tabla 27. Utilidades disponibles para socios

etapa	flujo disponible para socios	proyección tasa de inflación	valor presente anual	utilidad mensual	dinero disponible (utilidad mensual + reserva depreciación)
inversión	\$ (450.947.522,60)	3,4%	(\$ 450.947.522,60)	0	
0	\$ (77.498.201,64)	3,4%	(\$ 77.498.201,64)	(\$ 6.458.183,47)	(\$ 4.272.898,75)
1	\$ (73.802.767,77)	3,4%	(\$ 71.375.984,30)	(\$ 5.947.998,69)	(\$ 3.762.713,97)
2	\$ (70.088.647,29)	3,4%	(\$ 65.555.117,58)	(\$ 5.462.926,47)	(\$ 3.277.641,74)
3	\$ (66.355.204,87)	3,4%	(\$ 60.022.402,95)	(\$ 5.001.866,91)	(\$ 2.816.582,19)
4	\$ (62.601.783,55)	3,4%	(\$ 54.765.184,06)	(\$ 4.563.765,34)	(\$ 2.378.480,62)
5	\$ (58.827.704,07)	3,4%	(\$ 49.771.325,30)	(\$ 4.147.610,44)	(\$ 1.962.325,72)
6	\$ (55.032.264,03)	3,4%	(\$ 45.029.191,32)	(\$ 3.752.432,61)	(\$ 1.567.147,89)
7	\$ (51.214.737,17)	3,4%	(\$ 40.527.627,15)	(\$ 3.377.302,26)	(\$ 1.192.017,54)
8	\$ (47.374.372,56)	3,4%	(\$ 36.255.939,30)	(\$ 3.021.328,27)	(\$ 836.043,55)
9	\$ (4.383.180,32)	3,4%	(\$ 3.244.176,61)	(\$ 270.348,05)	\$ 1.914.936,67
10	\$ (3.640.612,29)	3,4%	(\$ 2.605.967,79)	(\$ 217.163,98)	\$ 1.968.120,74
11	\$ (2.872.796,94)	3,4%	(\$ 1.988.744,55)	(\$ 165.728,71)	\$ 2.019.556,01
12	\$ (2.078.875,87)	3,4%	(\$ 1.391.816,86)	(\$ 115.984,74)	\$ 2.069.299,98
13	\$ (1.257.961,48)	3,4%	(\$ 814.517,35)	(\$ 67.876,45)	\$ 2.117.408,28
14	\$ (409.136,00)	3,4%	(\$ 256.200,61)	(\$ 21.350,05)	\$ 2.163.934,67
15	\$ 623.170,89	3,4%	\$ 377.397,55	\$ 31.449,80	\$ 2.216.734,52
16	\$ 1.830.181,60	3,4%	\$ 1.071.927,88	\$ 89.327,32	\$ 2.274.612,05
17	\$ 3.078.230,68	3,4%	\$ 1.743.620,65	\$ 145.301,72	\$ 2.330.586,44
18	\$ 4.368.713,42	3,4%	\$ 2.393.226,81	\$ 199.435,57	\$ 2.384.720,29
19	\$ 5.703.072,58	3,4%	\$ 3.021.472,61	\$ 251.789,38	\$ 2.437.074,11
20	\$ 7.082.799,95	3,4%	\$ 3.629.060,43	\$ 302.421,70	\$ 2.487.706,42
21	\$ 8.509.438,05	3,4%	\$ 4.216.669,54	\$ 351.389,13	\$ 2.536.673,85
22	\$ 9.984.581,84	3,4%	\$ 4.784.956,88	\$ 398.746,41	\$ 2.584.031,13
23	\$ 11.509.880,53	3,4%	\$ 5.334.557,79	\$ 444.546,48	\$ 2.629.831,20
24	\$ 13.087.039,37	3,4%	\$ 5.866.086,72	\$ 488.840,56	\$ 2.674.125,28
25	\$ 14.717.821,61	3,4%	\$ 6.380.137,90	\$ 531.678,16	\$ 2.716.962,88
26	\$ 16.404.050,44	3,4%	\$ 6.877.286,05	\$ 573.107,17	\$ 2.758.391,89
27	\$ 18.147.611,06	3,4%	\$ 7.358.086,96	\$ 613.173,91	\$ 2.798.458,64
28	\$ 19.950.452,74	3,4%	\$ 7.823.078,18	\$ 651.923,18	\$ 2.837.207,90
29	\$ 21.814.591,03	3,4%	\$ 8.272.779,55	\$ 689.398,30	\$ 2.874.683,02
30	\$ 23.742.110,03	3,4%	\$ 8.707.693,83	\$ 725.641,15	\$ 2.910.925,87

Para finalizar la evaluación financiera del proyecto se tendrán en cuenta los valores presentes netos. WACC calculado para un nuevo empresario de la generación eléctrica y el WACC propuesto por SERFINCO para grande empresas existentes del mercado de energía colombiano. En la

Tabla 28, se muestra la gran diferencia que existe entre las oportunidades que tiene una nueva microempresa y una gran empresa del sector.

Tabla 28. Comparación WACC

	NUEVO EMPRESARIO	GRAN EMPRESA
WACC	18,34%	9,37%
VALOR PRESENTE NETO	\$ (733.840.752,80)	\$ (404.331.015,81)
RETORNO POR PESO INVERTIDO	-0,91	-0,50

Como se puede apreciar en la

Tabla 28, se muestra que la inversión no es atractiva, pues tanto para el escenario de un nuevo empresario como para empresas de gran tamaño del sector eléctrico, se presentan pérdidas de \$0,91 y \$0,50 por cada peso invertido respectivamente.

Los diseños del tornillo hidrodinámico del proyecto quebrada El Chuscal se realizaron para una operación permanente al 100 % de capacidad, esto quiere decir que es cálculo de las ventas mensuales se simplifica al hecho de determinar la base horaria de generación mensual correspondiente a 720 horas.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La discusión de resultados se realizará alrededor de cada uno de los objetivos específicos y se realizará en el orden que se propuso para el desarrollo del trabajo.

“Identificar proyectos representativos de generación hidroeléctrica a partir de tornillos hidrodinámicos”.

Luego de analizar varios casos de generación de energía por medio de tornillos hidrodinámicos se edificó la Tabla 29 con el fin de generalizar ciertos aspectos que se presentan en todos los proyectos de tornillos hidrodinámicos.

Tabla 29. Proyectos realizados por Mann Power Consulting Limited

PROYECTO	UBICACIÓN	ÁNGULO	POTENCIA	REDUCCIÓN CO2
[NOMBRE]	[PAÍS]	[°]	[KW]	[Ton]
Danbridge 's Mill	Reino Unido	22	4,6	7
Frensham	Reino Unido	22	11	32
Bealei's weir	Reino Unido	22	96	205
Linton Lock	Reino Unido	22	100	226

Realizando una simple inspección a los proyectos realizados por la compañías a la que pertenecen los proyectos mencionados en la Tabla 29 y a algunas empresas más dedicadas a este tema, entre ellas Spanns Babcock, Andritz contempladas en diversos puntos de este informe, se llega a la conclusión que el ángulo óptimo para la instalación de tornillo debe ser de 22°.

Con ayuda de la de la información suministrada en la Tabla 29, se construye la Figura 39 para analizar el comportamiento de la reducción de gases de invernadero en la atmosfera de acuerdo a la potencia instalada de los proyectos.

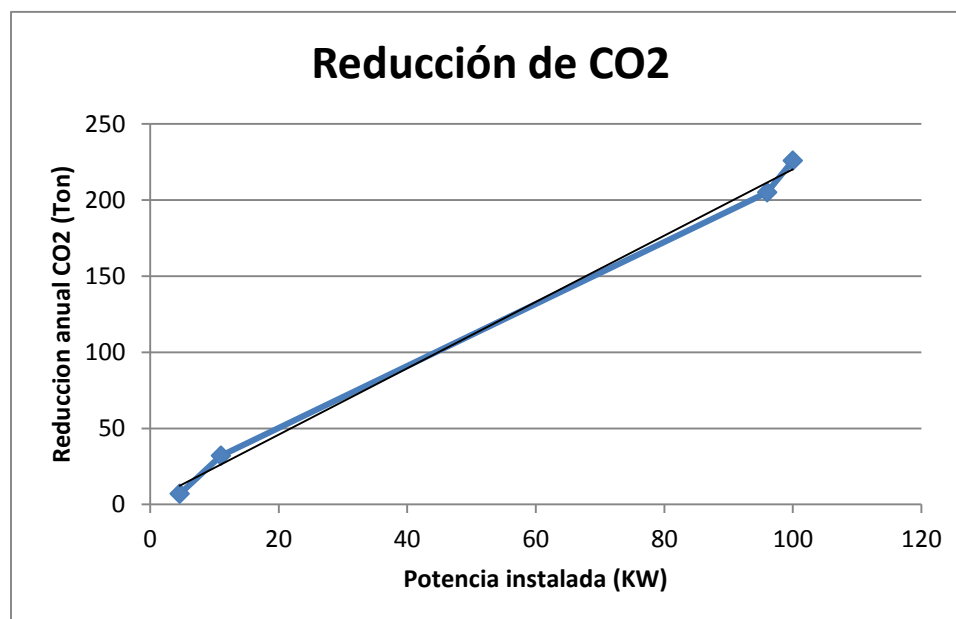


Figura 39. Relación de reducción de CO2 y potencia instalada

Se aprecia entonces como en la gráfica se presenta un comportamiento lineal, indicando que este tipo de proyectos sin importar su tamaño tienen un aporte positivo en el medio ambiente.

“Determinar las variables que inciden para el diseño de un proyecto de generación con tornillo hidrodinámico: caso de estudio quebrada El Chuscal”.

Las variables que inciden directamente en el diseño de un proyecto de este tipo son principalmente las propuestas por la ecuación (2), como la aceleración de la gravedad y la densidad del agua pueden considerarse como valores constantes, toman importancia en la determinación del diseño, las variables: cabeza de agua, caudal y eficiencia.

Se debe alternar con los valores de cabeza de altura y caudal, hasta una altura máxima de 10 m, pues con una caída mayor a esta es más viable económicamente generar por métodos convencionales como las turbinas.

“Analizar las posibles afectaciones ambientales: caso de estudio quebrada El Chuscal”.

Después de analizar diversos casos de estudios ambientales al tema de generación por medio de tornillos hidrodinámicos, se hace evidente entonces un impacto positivo que puede traer un proyecto de este tipo al medio ambiente, pues considerando el medio ambiente como un conjunto entre: naturaleza, economía y sociedad. Con un pequeño impacto ambiental se traen grandes beneficios en la parte económica y social de una comunidad.

Además de los aspectos mencionados, se hace necesario hacer referencia al aporte al medio ambiente que se encontró por medio de la búsqueda de referencias en otros proyectos, pues al reducir la cantidad de emisiones de efecto invernadero por producción de energía limpia se da un impacto positivo en el medio ambiente.

“Diseñar técnicamente un proyecto de generación de tornillo hidrodinámico: caso de estudio quebrada El Chuscal”.

Con ayuda de las ecuaciones propuestas por el profesor Chris Rorres se pudo diseñar geométricamente el tornillo hidrodinámico comprendiendo las variables de incidencia y llegando al diseño óptimo para el proyecto quebrada El Chuscal, con un diámetro externo de 1,300 m y una longitud de 5,739 m. Del diseño se logra comprender que a mayor longitud del tornillo su precio deberá crecer de manera proporcional y será entonces el diámetro externo el que determinará exclusivamente la capacidad del proyecto en términos de caudal.

“Realizar análisis económico de un proyecto de generación mediante tornillo hidrodinámico: caso quebrada El Chuscal”.

La viabilidad económica del proyecto quebrada El Chuscal indica pérdidas para dos escenarios de inversión: tanto para empresas emprendedoras como para empresas del sector. Se identifica claramente que la participación del costo de las líneas de transmisión determina que la inversión no sea atractiva.

5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

El diseño de un proyecto puntual implicó que durante el desarrollo de este trabajo se abordaran los principales aspectos del análisis hidrológico, del diseño de obras civiles, las consideraciones sobre los equipos electromecánicos y el análisis económico respectivo.

Acerca del estudio hidrológico se destaca su importancia para el proyecto, pues constituirá la fuente primordial para la generación eléctrica incidiendo directamente en la facturación del proyecto. El estudio hidrológico sobre la quebrada El Chuscal, además de información de caudales medios mínimos y máximos, se realizó a partir de una serie sintética de caudales (constituye un paso fundamental para proyectos de aprovechamiento hídrico) construida a partir de información de mediciones directas de caudal en otra quebrada de características similares. Sobre este aspecto se destaca que para aplicaciones prácticas esta sea una técnica de frecuente empleo pues al ser la tecnología de tornillos hidrodinámicos dirigida a quebradas y ríos pequeños, gran cantidad de estos cauces de agua no se encuentran instrumentados. Los resultados extrapolados entonces para la quebrada El Chuscal indican una viabilidad técnica sobre el concepto de presencia de caudales para un aprovechamiento de la escala planteada.

Las obras civiles para los proyectos de generación de tornillos hidrodinámicos corresponden a diseños y construcciones relativamente simples, tanto para su concepción como construcción. El diseño de estas obras para la quebrada El Chuscal consta de una estructura de tomadique y de un canal abierto, los cuales indican su viabilidad técnica y constructiva.

Los equipos electromecánicos comprenden el tornillo hidrodinámico, el generador (podrá implicar la necesidad de una caja de velocidades o no de acuerdo a su selección) y los elementos de control necesarios. Sobre este aspecto, en el caso de estudio quebrada El Chuscal se abordó el tema del diseño geométrico del tornillo y concluyendo sobre su construcción para la escala planteada, es factible su producción en la ciudad de Medellín (bajo pedido, no existe producción comercial). Adicionalmente, el generador corresponde a una pieza sobre la cual se busca ajustarse a soluciones comerciales para la reducción de costos. El desarrollo de este trabajo sugiere entonces la viabilidad técnica preliminar sobre el concepto de equipos para la generación y concluyendo finalmente sobre una viabilidad técnica general para el proyecto.

Por otro lado surge entonces la discusión sobre la viabilidad económica del proyecto. Este ámbito incluye entonces una discusión sobre las tarifas de venta de energía generada y su proyección en el tiempo, la valoración de las obras civiles y de los equipos electromecánicos, los ingresos por ventas de energía del proyecto y los egresos por concepto de tributación y mantenimiento primordialmente, llegando a una evaluación financiera del proyecto que sugiera su viabilidad económica o no.

Sobre las tarifas de venta se encuentra que existe una variabilidad pronunciada a lo largo del año, de acuerdo a las temporadas de invierno y verano, sobre la cual se realizó un minucioso análisis. Adicionalmente, se sugiere una estricta proyección de

las tarifas de venta de energía pues prever una similitud con las proyecciones macroeconómicas corresponde a una simplificación excesiva, debido a la larga vida útil de los proyectos de generación a partir de tornillos hidrodinámicos (más de 30 años) y sumado a la incógnita sobre la verdadera tendencia que verdaderamente seguirá la demanda energética ante los crecimientos poblacionales y el incremento de la calidad de vida.

La valoración de las obras civiles constituye un punto de crucial importancia para este tipo de proyectos. Se aprecia que las obras civiles pueden ser de simpleza sin precedentes para el sector de generación hidráulica, siendo este un punto atractivo pues significa economía en este aspecto y cronogramas de ejecución cortos y una significativa minimización de imprevistos.

La valoración de los equipos electromecánicos constituye entonces un punto definitivo para la viabilidad económica de estos proyectos. Para el caso de estudio corresponden a ítems con altísima participación en el costo del proyecto, al hablar del tornillo y el generador.

Se destaca el costo de la línea de transmisión para este tipo de proyectos. Los costos indicativos sugieren un valor elevado para este ítem en relación a los demás elementos de equipo. No obstante, no se realizó una valoración al detalle lo que podría indicar una reducción de este rubro. Es tal la participación porcentual en el costo del proyecto, que puede significar entonces una no viabilidad económica. De esta forma se concluye que este tipo de proyectos deberá ejecutarse en sitios con impliquen el trazado de líneas de transmisión lo más cortas posibles.

Otra opción correspondería a que los proyectos se construyan para situaciones de autoconsumo eléctrico, es decir, que una empresa decida realizar inversiones en tornillos hidrodinámicos si se encuentran en proximidades de corrientes de agua y así puedan suplir parcial o totalmente su consumo. Incluso esta alternativa puede repercutir en menores costos de la energía para la compañía que efectuar la tradicional compra a las empresas de servicios públicos. También se incluiría esta posibilidad para empresas que tengan vertimientos de aguas a ríos o quebradas y que la entrega se haga con cierta cabeza de altura.

BIBLIOGRAFÍA

Ámbito. (s.f.). Recuperado el 21 de 10 de 2013, de www.ambito.com

Andritz. (s.f.). *Andritz*. Recuperado el 11 de 3 de 2013, de www.andritz.com

Ángel Sanint, E., Mesa Sánchez, Ó. J., & Rubiano Ortegón, C. (1988). *Estimación de Caudales Máximos y Mínimos en 162 Cuencas del Oriente Antioqueño*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Bancolombia, D. d. (2012). *Informe de proyecciones macroeconómicas*. Grupo Bancolombia.

Bielefeld, D. H. (2001). *Fish Monitoring and Live Fish Trials*. Germany : Fish Monitoring and Live Fish Trials.

Corrigan, J. (2008). *Tess Barrage White Water Course Upgrade*. Londres.

Damodaran, A. (s.f.). *Damodaran Online*. Recuperado el 20 de 10 de 2013, de <http://people.stern.nyu.edu/adamodar/>

Enciclopedia Financiera. (s.f.). Recuperado el 20 de 10 de 2013, de <http://www.enciclopediafinanciera.com>

encrypted. (s.f.). Recuperado el 03 de 08 de 2013, de https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTES2p3IVzfNcpAV4MgOttu-1oM3PuhozTIAdt5L4sqxbycpcV_g

Encyclopedia britannica. (1911). Londres.

ENERGIA, R. D. (2005). COSTOS INDICATIVOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN COLOMBIA.

Energía, U. d. (2005). *Costos Indicativos de Generación Eléctrica en Colombia*. Bogotá.

Escuela de Ingeniería de Antioquia. (s.f.). *Mecánica de Fluidos y Recursos Hidráulicos*. Recuperado el 05 de 09 de 2013, de <http://fluidos.eia.edu.co/>

Expertos en Mercados. (s.f.). *Expermtos en Mercados*. Recuperado el 13 de 8 de 2013, de www.xm.com.co

Heritage Lottery Fund. (05 de 11 de 2012). Recuperado el 25 de 08 de 2013, de http://www.hlf.org.uk/news/Pages/Morden_Hall_Park_Archimedes_screw.aspx#Vg0-e9J1650

Municipio de Jardín. (s.f.). Recuperado el 01 de 08 de 2013, de www.jardinantioquia.com/restaurantes/trucheras

Natioal Trust. (s.f.). Recuperado el 10 de 08 de 2013, de <http://nationaltrust-mordenhallpark.blogspot.com/>

Rodríguez, E. A. (2012). *Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la estimación de caudales ambientales*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Rorres, C. (2000). The turn Of The Screw: Optimal Design Of An Archimedes Screw. *Journal O Hydraulic Engineering* , 72-80.

S.J. Williamson, B. S. (2011). Low Head Pico Hydro Turbine Selection using a Multi-Criteria Analysis. *World Renewable Energy Congress 2011* .

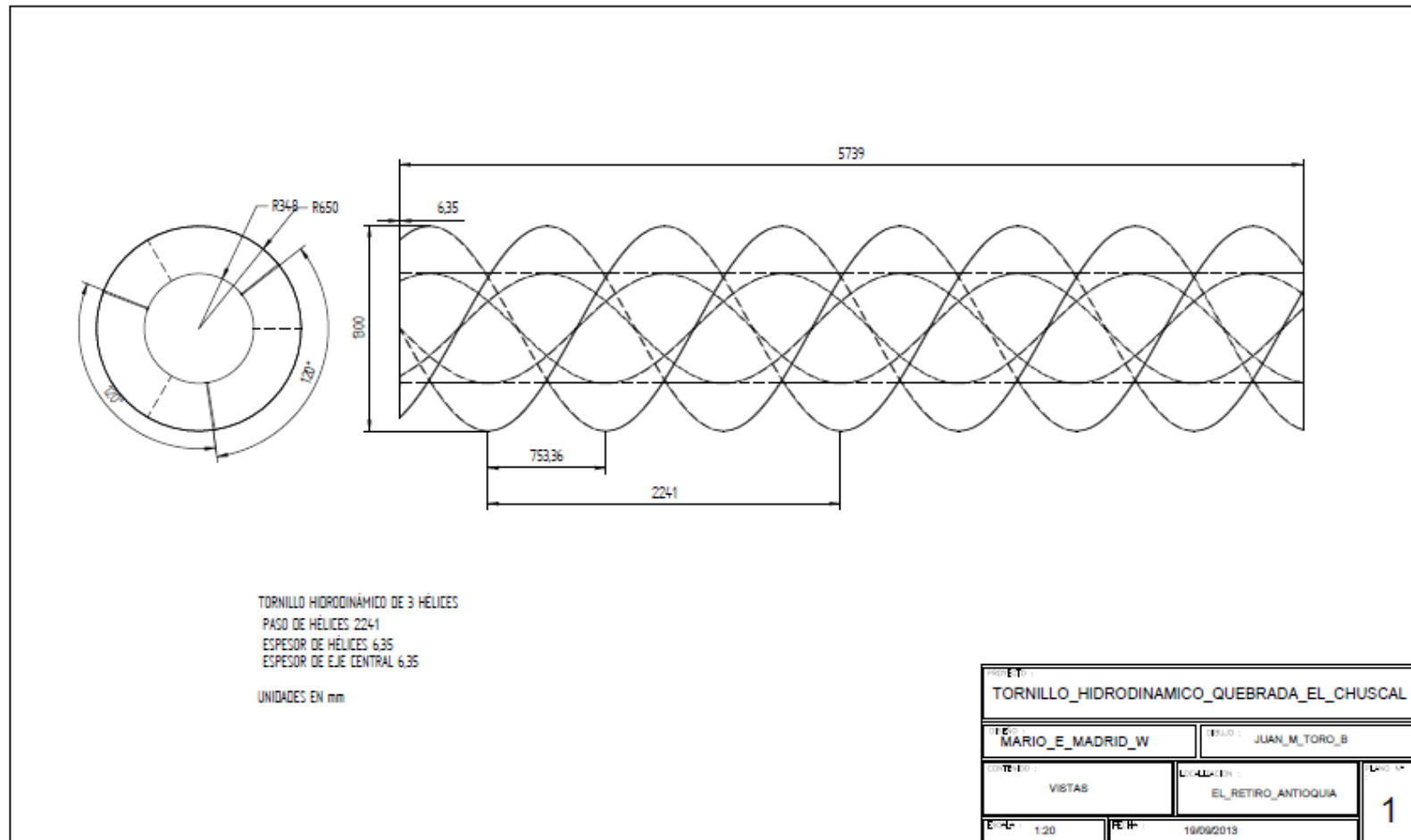
Sotelo Ávila, G. (1997). *Hidráulica General*. Banderas: Limusa.

Sustainable Merton. (s.f.). Recuperado el 25 de 08 de 2013, de <http://sustainablemerton.org/2012/11/12/londons-first-archimedes-screw-turbine/>

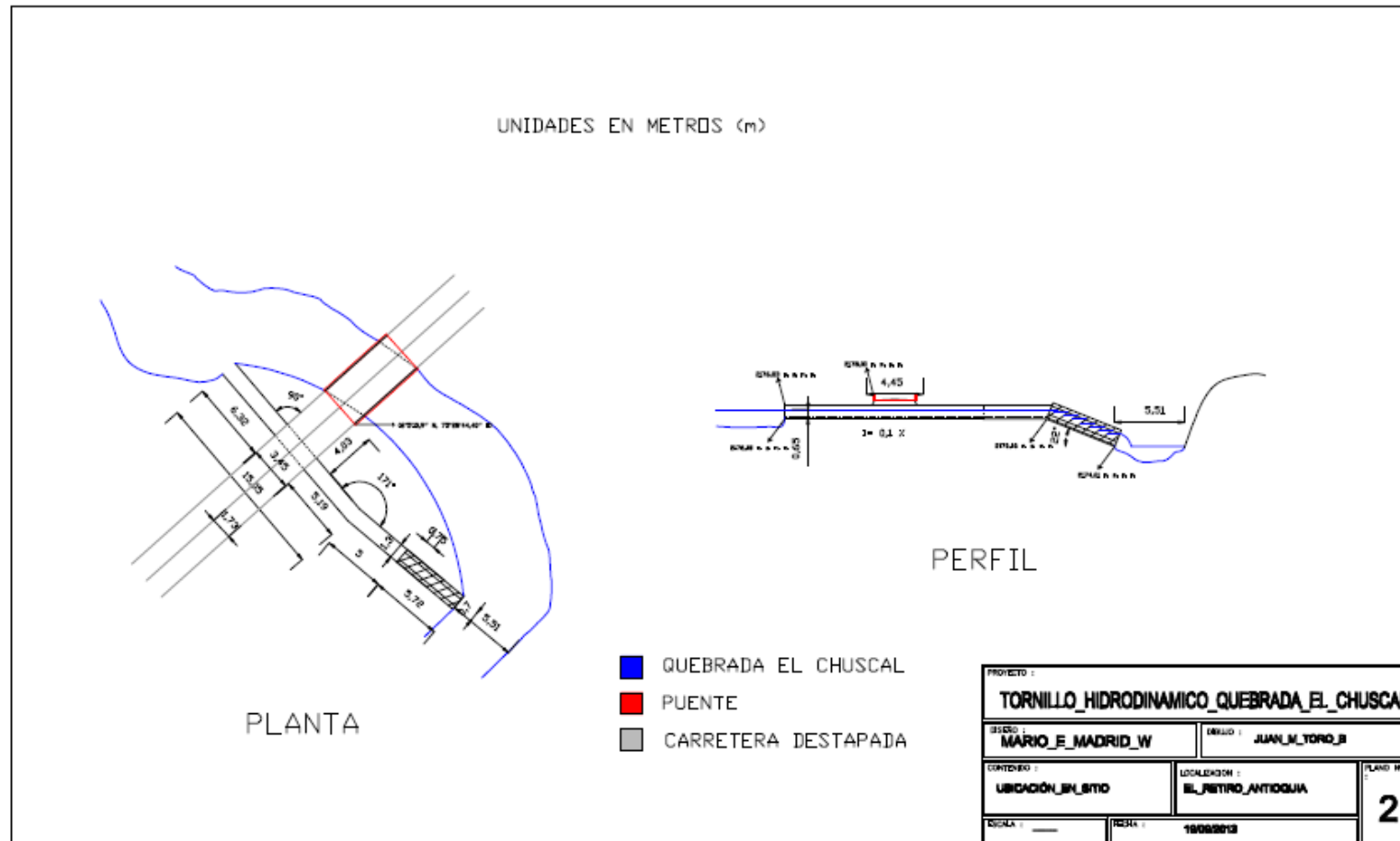
Tuffrey, L. (19 de 06 de 2013). *The Guardian*. Recuperado el 25 de 08 de 2013, de <http://www.theguardian.com/environment/2012/jul/19/hydroelectric-turbine-energy-london>

Unidad de Planeación Minero Energética. (22 de 8 de 2013). Obtenido de Unidad de Planeación Minero Energética

ANEXO 1. PLANO CONSTRUCTIVO DE TORNILLO HIDRODINÁMICO PROYECTO QUEBRADA EL CHUSCAL



ANEXO 2. PLANO DE TRAZADO EN PLANTA Y EN PERFIL DEL PROYECTO.



ANEXO 3. COTIZACIÓN TORNILLO HIDRODINÁMICO



COTIZACIÓN 2013-235

Medellín 27 de septiembre de 2013

SR DIEGO MADRID

OBRA TORNILLO HIDRODINAMICO DE 3 HELICES

E-mail: diegomadridp@gmail.com

Atendiendo su amable solicitud de cotización tenemos el gusto de presentarles nuestra siguiente oferta.

DESCRIPCION	CANTIDAD	V/R UNITARIO	V/R BASE
Fabricación y suministro de tornillo hidrodinámico de tres hélices según plano	1	13.840.000	13.840.000

Los precios dados son antes del 16% de IVA

COMPRENDE: FABRICACION Y SUMINISTRO DE TORNILLO METALICO DE TRES HELICES SEGÚN PLANOS.

MATERIAL LAMINA ASTM A 36 DE ¼ DE PULGADA DE ESPESOR

PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA Y SOLDADORES CALIFICADOS BAJO NORMAS DE LA AWS.

FORMA DE PAGO: 50% DE ANTICIPO Y 50% CONTRA ENTREGA

VALIDEZ DE LA OFERTA: A LA FECHA.

TIEMPO DE EJECUCION: A CONVENIR

ACABADO: LIMPIEZA QUIMICA MANUAL MAS BASE ANTICORROSIVA EXT

Con el ánimo de prestarles un excelente servicio y en espera de sus Comentarios.

Cordial Saludo.

ENRIQUE CHARRY C.

ING. DE PROYECTOS

CEL. 313 643 55 38 – 311 624 35 85

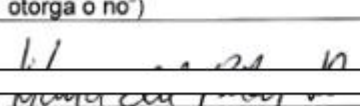
TEL 232 35 74 EXT 154




ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA

ACTA DE EVALUACIÓN FINAL DE TRABAJO DE GRADO

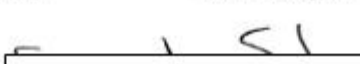
Fecha: (dd/mm/aa)	19/11/2013						
Nombre del proyecto:	Viabilidad técnica y económica de tornillos hidrodinámicos para generación eléctrica						
Director del proyecto:	Santiago Ortega Arango						
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nombre del estudiante</th> <th>Programa académico</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Juan Manuel Toro</td> <td>Ingeniería Civil</td> </tr> <tr> <td>Mario Madrid</td> <td>Ingeniería Civil</td> </tr> </tbody> </table>		Nombre del estudiante	Programa académico	Juan Manuel Toro	Ingeniería Civil	Mario Madrid	Ingeniería Civil
Nombre del estudiante	Programa académico						
Juan Manuel Toro	Ingeniería Civil						
Mario Madrid	Ingeniería Civil						
Nombre del Jurado:							
Evaluación del proyecto:							
<input type="checkbox"/> No aprobado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado							
Espacio exclusivo para jurado							
<input type="checkbox"/> Mención Pública <input type="checkbox"/> Mención honorífica <input type="checkbox"/> Trabajo laureado							
Justificación del reconocimiento: (Artículo 28 del Acuerdo 11: "El director del Programa presentará el acta final de evaluación al Consejo Académico, donde consta la solicitud de mención especial debidamente justificada y el Consejo determinará si se otorga o no")							



 Director del Programa



 Director del Trabajo de Grado



 Jurado